

КОРМОПРОИЗВОДСТВО /
FODDER PRODUCTION<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.1.76-84>

УДК 631.5: 631.6

**Изучение динамики продуктивности трав на основе данных многолетнего мониторинга**

© 2021. Д. А. Иванов✉, О. В. Карасева, М. В. Рублюк

ФИЦ «Почвенный институт им. В. В. Докучаева», г. Москва, Российская Федерация

В работе показаны методы исследования банка данных мониторинга урожайности трав в пределах агроландшафта. Мониторинг урожайности разновозрастных (1, 2 и 3 годы пользования) злакобобовых травостоев проводили в 2001-2019 гг. на агроэкологическом полигоне, расположенном в пределах конечно-моренного холма в постоянных точках опробования на трансекте, пересекающей все основные микропозиции агроландшафта. Исследовали влияние особенностей различных ландшафтных структур (склонов разной экспозиции, ландшафтных выделов в их пределах и пестроты почвенного покрова) на динамику урожайности трав. Массив полученных данных обрабатывали методами *Variable Components Analysis*, главных компонент и корреляционного анализа. Показано, что на продуктивность трав достоверно влияют особенности ландшафта, агроклиматические условия года и возраст травостоя. На формирование пространственной пестроты урожайности трав в наибольшей степени влияет характер почвенного покрова ($\approx 21\%$), в меньшей степени особенности отдельных частей склонов ($\approx 17\%$). Установлено, что по мере старения травостоя наблюдается заметное увеличение влияния на пространственную вариабельность их продуктивности экспозиционного (с 3,4 до 8,0 %) и микроландшафтного (с 16 до 22 %) факторов и снижение влияния особенностей почвенного покрова (с 24 до 18 %). Выявлено, что динамика агроклиматических параметров заметно воздействует лишь на зависимость пестроты урожайности от экспозиционного фактора. Сделана попытка разделить годы исследований по характеру динамики урожайности трав на однородные в агроклиматическом отношении группы. Определено, что разные группы лет наблюдений отличаются по продуктивности и характеру ее пространственно-временной вариабельности, а также по факторам, их определяющим, и по условиям, влияющим на эти факторы. Это заставляет при процедуре прогнозирования урожайности трав разного возраста создавать математические модели ее зависимости от ландшафтных условий для временных кластеров.

Ключевые слова: многолетние травы, агроландшафт, трансекта, статистический анализ

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель (ВНИИМЗ) (тема №0651-2019-0005).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Иванов Д. А., Карасева О. В., Рублюк М. В. Изучение динамики продуктивности трав на основе данных многолетнего мониторинга. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(1):76-84.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.1.76-84>

Поступила: 03.11.2020

Принята к публикации: 11.01.2021

Опубликована онлайн: 22.02.2021

Study of the dynamics of herbs productivity based on long-term monitoring data

© 2021. Dmitry A. Ivanov✉, Olga V. Karaseva, Maria V. Rublyuk

Federal Research Centre V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russian Federation

The paper shows methods for studying the data bank for monitoring the yield of grasses within the agrolandscape. Monitoring of the yield of different-aged (1, 2 and 3 years of use) grass legumes was carried out in 2001-2019 at an agroecological test site located within a finite moraine hill at permanent sampling points on a transect that crosses all the main micropositions of the agricultural landscape. The influence of the features of various landscape structures (slopes of different exposure, landscape plots within their limits and the variegation of the soil cover) on the dynamics of grass yield was studied. The data array was processed using the methods of *Variable Components Analysis*, principal components, and correlation analysis. It is shown that the productivity of grasses is reliably influenced by the features of the landscape, agroclimatic conditions of the year and the age of the grass stand. The formation of the spatial variegation of the herb yield is most influenced by the nature of the soil cover ($\approx 21\%$), to a lesser extent by the features of individual parts of the slopes ($\approx 17\%$). It was found that with the aging of the herbage, there is a noticeable increase in the influence of exposure (from 3.4 to 8.0 %) and microlandscape (from 16 to 22 %) factors on the spatial variability of their productivity, and a decrease in the influence of soil

cover characteristics (from 24 to 18 %). It was revealed that the dynamics of agroclimatic parameters noticeably affects only the dependence of the variegated yield on the exposure factor. An attempt has been made to divide the years of research by the nature of the dynamics of the yield of grasses into agro climatically homogeneous groups. It has been determined that different groups of observation years differ in productivity and in the nature of its spatio-temporal variability, as well as in the factors that determine them and in the conditions that affect these factors. This makes, when predicting the yield of grasses of different ages, to create mathematical models of its dependence on landscape conditions for different time clusters.

Key words: *perennial grasses, agricultural landscape, transect, statistical analysis*

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the All-Russian Research Institute of Reclaimed Lands (theme No. 0651-2019-0005). The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citations: Ivanov D. A., Karaseva O. V., Rublyuk M. V. Study of the dynamics of herbs productivity based on long-term monitoring data. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(1):76-84. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.1.76-84>

Received: 03.11.2020

Accepted for publication: 11.01.2021

Published online: 22.02.2021

Продукционный потенциал агроландшафтов, с точки зрения агрономии, оценивается, в основном, по усредненной урожайности культур. Однако урожайность культур определяется многими факторами, часто не зависимыми друг от друга – наряду с антропогенными (особенности агротехники), на нее воздействуют ландшафтно-почвенные особенности природной среды, а также параметры агроклиматических обстановок. Влияние последних на урожайность травостоя во многом определяет характер динамических процессов в геокомплексе [1]. Кроме почвенных условий и микроклиматических особенностей агроландшафта, растение учитывает также биоценоотические взаимоотношения с сорной растительностью и многое другое. Это приводит к значительной пространственно-временной пестроты урожайности, которая осложняет процесс определения истинного продукционного потенциала геосистемы [2].

Исследование характера этой пестроты позволяет выявить основные закономерности формирования продукционной способности агрогеосистемы, факторы ее определяющие, пределы ее колебаний и другие параметры, позволяющие характеризовать территорию по ее главному для человека критерию – возможности производить биомассу [3]. В наиболее общем виде эту проблему рассматривают географы и геоботаники. Исследования Н. Л. Беручашвили¹ показали, что в пределах ландшафта количество фитомассы может различаться на значения того же порядка, что и между различными географическими зонами. По данным Н. И. Базилевич, О. С. Гребенщикова и А. А. Тишкова [4], наблюдаются весьма

значительные различия по фитомассе в пределах катен, заложенных в различных зонах, несмотря на сравнительно однородные гидро-термические условия.

Процессы формирования урожая сельскохозяйственных культур в условиях различных элементов рельефа изучались многими российскими и иностранными авторами. Так, Р. Jiang и К. Thelen отмечали, что в условиях штата Мичиган совокупное воздействие как почвы, так и рельефа менялось в зависимости от года и объясняло от 28 до 85 % наблюдаемой изменчивости урожайности кукурузы и сои [5]. Н. И. Картамышев [6], заложивший на разных элементах рельефа (южный склон, водораздел и северный склон) в подготовленные траншеи с изолированными стенками гомогенную массу пахотного горизонта одной и той же почвы, показал, что в течение всего многолетнего опыта эффективное плодородие было наибольшим на южном склоне, средним – на водоразделе и наименьшим – на северном склоне. М. Г. Шарипов с соавторами в 1978 году установил, что урожай яровой пшеницы достоверно зависит от крутизны склона [7]. Большая подборка материалов о влиянии различных удобрений на произрастание культур в пределах склонов различной экспозиции дана в книге А. Н. Каштанова и В. Е. Явтушенко [8]. В работе Е. Н. Саввиной [9] описывается процесс изменения продуктивности культур плодосменного севооборота в пределах мезохолмов Клиско-Дмитровской гряды. Ею выявлено, что урожай картофеля, озимой пшеницы и многолетних трав уменьшался вниз по склону в 3-4, 2-3 и 1,5-2 раза соответственно.

¹Беручашвили Н. Л. Четыре измерения ландшафта. М.: Мысль, 1986. 182 с.; Беручашвили Н. Л. Геофизика ландшафта. М.: Высшая школа, 1990. 287 с.

В неблагоприятные годы амплитуда колебания урожайности увеличивалась, особенно на более окультуренных почвах. В. И. Балакшина и М. Ф. Кононов в 1998 году убедительно показали сильную зависимость биометрических параметров и продуктивности с.-х. культур от экспозиции склона и относительной высоты [10]. К. Хейнеманн с соавторами установил, что введение сюжетно-инвариантных по времени параметров почвы и рельефа улучшило возможность проведения испытаний и моделирования эффективности обработки урожайных данных в рамках долгосрочных полевых испытаний [11]. Вопросам изменения продуктивности культур в пределах склонов различной формы и экспозиции посвящены исследования многих агроклиматологов² [12, 13]. Закономерное изменение урожайности они объясняют неравномерным распределением тепла и влаги.

В данной работе затронуты вопросы совместного влияния комплекса природных факторов (структурных элементов рельефа и почвенного покрова, климатических особенностей и возраста агроценоза) на характер пространственно-временной динамики урожайности многолетних трав. Знание особенностей пространственно-временной вариабельности урожайности культур позволяет разработать алгоритм ее прогнозирования во времени и пространстве, на основе которого могут быть созданы ландшафтно-мелиоративные системы земледелия различных территорий [14].

Современным методом исследования пространственно-временной вариабельности урожайности культур является ее долговременный мониторинг в пределах агроэкологических стационаров, наиболее полно выполняющийся в режиме ландшафтно-полевого опыта (ЛПО) [14].

Цель исследований – выявление факторов, определяющих особенности пространственно-временной динамики продуктивности разновозрастных травостоев в различных ландшафтных и агроклиматических условиях в пределах агроэкологического стационара ВНИИМЗ.

Материалы и методы. Долговременный мониторинг урожайности сена клеверотимофеечных травостоев 1, 2 и 3 г. п. проводили в 2001-2019 гг. на агроэкологическом стационаре Всероссийского научно-исследовательского института мелиорируемых земель, распо-

ложенном в пределах конечно-моренного холма в 4-х км к востоку от г. Тверь. Холм, относительной высотой 15 м, состоит из плоской вершины, северного пологого склона, крутизной 2-3°, южного более крутого склона (3-5°) и межхолмных депрессий (северной и южной) [15]. Почвообразующие породы на территории стационара – двучленные отложения. На южном склоне пахотные горизонты почв имеют песчаный и супесчаный гранулометрический состав, мощность легкого наноса местами превышает 1,5 м. На вершине и северном склоне пахотные горизонты сложены супесью и легким суглинком, мощность легкого кроющего наноса колеблется около 1 м, местами в межхолмной депрессии морена выходит на поверхность. В нашем опыте различия в экспозиции склонов определяют не только разницу в прогреве территории, но и неоднородность гранулометрического состава почв, что во многом определяется генезисом конечно-моренных образований³.

Почвенный покров представлен вариацией-мозаикой дерново-подзолистых глееватых и глеевых почв, развивающихся на двучленных отложениях различной мощности [15]. Агрохимические параметры почв колеблются в следующих пределах: рН_{KCl} – от 4,9 до 5,7, гумус – от 1,5 до 3,0 %, K₂O – от 8,0 до 10,0 мг/кг, P₂O₅ – от 195 до 400 мг/кг, N_{лид} – от 22,4 до 42,2 мг/кг.

Исследования проводили на агроэкологической трансекте (физико-географическом профиле) – узком поле, пересекающем все микроландшафтные позиции конечно-моренного холма: 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, и элювиально-аккумулятивный ландшафт вершины, в пределах которого происходит вертикальное промывание почвенного профиля и локальная аккумуляция влаги в микропонижениях (блюдцах).

²Гольцберг И. А. Агроклиматическая характеристика заморозков в СССР и методы борьбы с ними. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 300 с.

³Борзов А. А. Геоморфология Калининской области. Ученые записки МГУ. Вып. 23. М., 1938. С. 16-54.

Трансекта состоит из 7 продольных полос, каждая из которых засеяна отдельной культурой зернотравяного севооборота. Технология выращивания культуры однотипна по всей полосе. Разновозрастные клеверотимофеечные травостои, сеянными компонентами которых являются клевер красный (ВИК 7) и тимopheевка луговая (ВИК 9), располагаются на трех параллельных полосах, ширина каждой из них – 7,2 м, а длина – 1300 м. Травостои эксплуатируются в одноукосном режиме без внесения удобрений. Точки опробования, в которых определялась масса сена, равномерно расположены вдоль трансекты на расстоянии 10 м друг от друга.

Результаты мониторинга урожайности обрабатывали на основе пакетов STATGRAPHICS plus и STATISTICA 7. Применяли программу Variable Components Analysis, которая позволяет оценить зависимость вариативности урожайности травостоя за каждый год от условий разномасштабных структурных образований в пределах агроландшафта. Наиболее крупными частями в пределах конечно-моренной гряды являются склоны разной экспозиции. В пределах склонов располагаются агромикрорландшафты. Самыми мелкими структурными частями являются пятна почв разной степени заболоченности (гидроморфизма).

Для интерпретации результатов наблюдений использовали параметры агроклиматических обстановок в годы исследований как полученные в ходе мониторинга, так и заимствованные из базы данных Тверской метеостанции. В ходе работы использовались следующие агроклиматические показатели: 1. Влажность почв (% от объема почвы). 2. Сумма активных температур воздуха $\sum t > 10^\circ$. 3. Сумма осадков за вегетационный период, мм. 4. ГТК по Селянинову.

Для группировки годов исследований по агроклиматическим обстановкам применяли метод факторного анализа (описательный пакет STATISTICA 7), а именно метод главных компонент, способный разложить совокупность вариативности массива данных (в нашем случае показателей урожайности трав) на компоненты, ее определяющие, интерпретация их позволяет выявить основные факторы, от которых она зависит. Для изучения влияния агроклиматических условий на степень зависимости урожайности трав от характера природной среды ландшафтных структур использован метод корреляционного анализа.

Результаты и их обсуждение. Анализ данных долговременного мониторинга показал, что при экстенсивном использовании травостоев среднегодовалая продуктивность трав 1 и 2 г. п. достоверно не различалась (3,66 и 3,63 т/га сена соответственно). Травы 3 г. п. сформировали значительно меньший урожай сена – 2,77 т/га, что объясняется выпадением бобовых и внедрением в травостой сорных видов. Минимальная пространственная вариативность среднегодовых показателей урожайности наблюдалась на травах 2 г. п. ($V = 44,9\%$) вследствие относительного равновесия между бобовыми и злаками. В агроценозах с доминированием клевера или с его отчетливым недостатком пространственная вариативность урожайности выражена сильнее: на травах 1 г. п. – 50,8 %, 3 г. п. – 47,9 %.

Результаты обработки данных по продуктивности трав методом Variable Components Analysis показаны в таблице 1. Анализ данных таблицы 1 показал, что влияние разномасштабных структурных частей агроландшафта на пространственную вариативность урожайности травостоев в основном зависит от агроклиматических условий года и возраста травостоя. Максимальное воздействие на пространственную вариативность урожаев сена оказывают особенности почвенного покрова – его усредненное по травостоям значение $\approx 21\%$. Микрорландшафтные особенности конечно-моренной гряды в среднем определяют $\approx 17\%$ вариативности урожайности трав, а экспозиционный фактор только $\approx 6\%$.

Средние значения суммарных влияний структурных частей, которые отражают влияние ландшафта в целом на урожайность сена, заметно зависят от возраста травостоя. Старые травостои сильнее реагируют на особенности структурных факторов агроландшафта, чем зрелые и молодые. Коэффициенты вариативности суммарных влияний у трав 3 г. п. также заметно выше, что свидетельствует об их большей зависимости от агроклиматических условий.

По мере старения травостоя наблюдается заметное увеличение влияния на пространственную вариативность их продуктивности экспозиционного (с 3,4 до 8,0 %) и микрорландшафтного (с 16 до 22 %) факторов и снижение влияния особенностей почвенного покрова (с 24 до 18 %). Это обусловлено возникновением в разных частях агроландшафта обособленных агрофитоценозов, вследствие внедрения в травостой аборигенных видов, которые значительно сильнее приспособлены к местным условиям.

Таблица 1 – Влияние условий структурных частей агроландшафта на вариабельность урожайности многолетних трав, % /

Table 1 – Influence of conditions of different structural parts of the agricultural landscape on the variability of the yield of perennial grasses, %

Год / Year	Структурные элементы агроландшафта / Structural elements of the agricultural landscape											
	травы 1 г. п. / herbs 1 year of use				травы 2 г. п. / herbs 2 year of use				травы 3 г. п. / herbs 3 year of use			
	экспозиция / exposure	АМЛ / AML	почва / soil	сумма / total	экспозиция / exposure	АМЛ / AML	почва / soil	сумма / total	экспозиция / exposure	АМЛ / AML	почва / soil	сумма / total
2001	2,89	0,00	26,90	29,79	0,00	26,93	10,57	37,5	4,85	16,88	22,52	44,25
2002	8,47	12,08	16,74	37,29	0,00	0,00	25,03	25,03	7,45	41,17	0,00	48,62
2003	2,83	20,96	0,00	23,79	7,22	16,78	1,56	25,56	5,17	34,70	0,00	39,87
2004	7,24	14,82	0,00	22,06	0,00	0,00	46,33	46,33	0,00	0,00	23,03	23,03
2005	0,00	21,32	13,09	34,41	0,00	33,62	0,00	33,62	0,00	22,13	19,48	41,61
2006	0,00	60,35	0,00	60,35	0,66	0,33	45,48	46,47	2,49	0,00	25,66	28,15
2007	9,88	3,44	49,33	62,65	0,00	53,72	0,00	53,72	10,74	17,08	37,48	65,30
2008	0,00	7,32	21,59	28,91	38,09	12,62	21,36	72,07	14,96	21,07	18,65	54,68
2009	11,00	20,10	12,90	44,00	0,00	0,00	49,83	49,83	0,00	2,77	28,76	31,53
2010	0,00	7,92	52,47	60,39	1,81	0,00	28,45	30,26	5,66	31,59	14,14	51,39
2011	0,00	6,75	43,20	49,95	0,00	22,16	9,31	31,47	6,76	49,44	0,00	56,20
2012	0,00	0,00	30,12	30,12	9,69	1,81	21,69	33,19	0,00	0,00	7,66	7,66
2013	0,00	29,14	0,00	29,14	0,00	15,86	16,81	32,67	12,80	18,39	29,77	60,96
2014	0,00	18,86	35,63	54,49	4,64	5,56	39,00	49,20	34,15	9,73	33,25	77,13
2015	0,00	16,98	55,53	72,51	0,00	0,00	21,71	21,71	0,75	6,77	21,96	29,48
2016	0,00	10,75	21,64	32,39	18,47	0,66	22,71	41,84	18,36	0,00	29,59	47,95
2017	12,28	3,24	31,24	46,76	3,59	0,00	40,96	44,55	2,99	48,87	20,38	72,24
2018	7,72	26,40	15,76	49,88	9,22	41,31	19,99	70,52	16,17	40,33	0,90	57,40
2019	2,43	15,06	26,36	43,85	14,00	8,03	18,36	40,39	7,17	54,12	0,00	61,29
\bar{x}	3,40	15,60	23,80	42,80	5,70	12,60	23,10	41,40	7,90	21,8	17,50	47,30
V (%)	129,3	120,2	75,4	33,7	160,9	136,6	65,1	33,5	106,2	84,1	72,7	37,4

Годы исследований различались по агроклиматическим условиям, которые влияли на характер проявления пространственной вариабельности урожайности трав. Методом корреляционного анализа выявлено, что наименее чувствительными к изменениям агроклиматических условий являются травы 2 г. п., вследствие оптимального соотношения злаков и бобовых в их составе. Максимальная зависимость от агроклиматических условий года обнаружена у старых травостоев, в значительной степени образованных автономными фитоценозами, по-разному реагирующими на однотипные изменения погодных условий.

Степень влияния структурных отдельных агроландшафта на вариабельность урожайности трав в основном слабо зависит от

изменчивости агроклиматических параметров. На основе анализа корреляций выявлено, что характер и сила зависимости урожайности от экспозиции в определенной степени «подчиняется» временной динамике ГТК. На травах 1 г. п. при его увеличении наблюдается некоторое усиление влияния экспозиции на вариабельность урожая ($r = 0,47$)⁴. На травах 3 г. п. отмечена обратно пропорциональная зависимость – усиление влияния экспозиции на пространственную изменчивость продуктивности наблюдается в засушливые годы ($r = -0,44$). Увеличение влажности почвы иногда приводит к снижению суммарного влияния ландшафта на урожайность трав 1 и 3 г. п. ($r = -0,37$ и $r = -0,35$ соответственно). На травах 2 г. п. эти закономерности не проявляются.

⁴Достоверны коэффициенты корреляции > [0,3].

В отличие от корреляционного анализа, метод главных компонент позволяет получить комплексную оценку влияния совокупности

агрометеоусловий на продуктивность трав. На его основе созданы группы лет наблюдений для каждого травостоя (рис. 1).

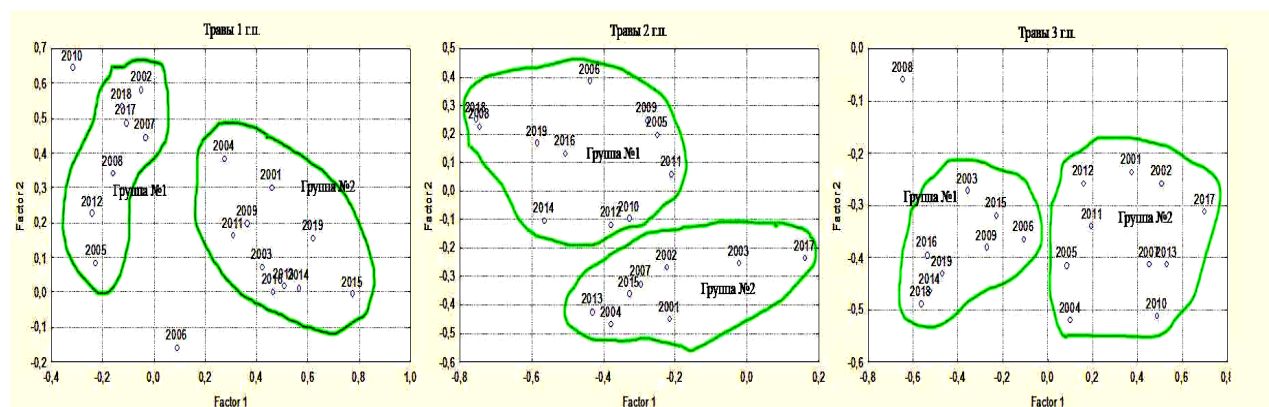


Рис. 1. Группы лет исследований по характеру воздействия агроклиматических условий на динамику урожайности трав /

Fig. 1. Grouping the years of research according to the nature of the impact of agro-climatic conditions on the dynamics of grass yield

Основным фактором объединения лет в группы на всех травостоях является многолетняя динамика суммы осадков и ее производная – вариабельность влажности почв. Первая группа лет на всех травах характеризуется повышенным фоном осадков и влажности почв. Это не всегда отражается на изменении ГТК, так как сумма температур изменяется иначе. Группы лет, в условиях каждого травостоя, достоверно различались по средней урожайности.

Из данных таблицы 2 видно, что на травах 1 г. п. группа, объединяющая влажные и прохладные годы (группа 1), характеризуется высокой и устойчивой средней продуктивностью, которая, по сравнению со второй группой, сильнее зависит от экспозиционного фактора и особенностей почвенного покрова. Степень воздействия экспозиции на продуктивность трав заметно зависит от характера динамик влажности почв и осадков ($r = -0,51$ и $-0,61$ соответственно)⁵.

Таблица 2 – Параметры групп урожайности трав /
Table 2 – Parameters of grass yield groups

Группа / Group	Урожайность / Productivity		Степень влияния структурных параметров, % / Degree of influence of structural parameters, %				Агроклиматические параметры / Agroclimatic parameters			
	\bar{x} , т/га / \bar{x} , t/ha	V, %	экспозиция / exposure	АМЛ / AML	почва / soil	сумма / total	влажность почв, % / soil moisture, %	осадки, мм / precipitation, mm	$\Sigma t > 10^\circ$	ГТК / GTK
Травы 1 г. п. / Herbs 1 year of use										
1	38,0	25,4	5,5	10,5	25,4	41,4	19,2	372,4	1954,9	1,73
2	31,2	28,3	2,6	15,3	22,2	40,2	16,7	333,8	2051,9	1,47
Травы 2 г. п. / Herbs 2 year of use										
1	30,2	26,8	8,8	11,5	25,1	45,4	18,3	368,2	2039,9	1,52
2	44,7	18,9	1,4	14,2	20,4	35,9	15,8	317,1	1934,4	1,58
Травы 3 г. п. / Herbs 3 year of use										
1	25,6	28,7	11,0	18,8	17,6	47,5	16,4	337,2	2031,8	1,45
2	30,0	25,7	10,5	18,6	17,5	46,6	15,7	323,1	2050,1	1,38

⁵ Достоверны коэффициенты корреляции $> [0,5]$.

Во второй группе также наблюдается сильная зависимость степени влияния экспозиционного фактора на урожайность от влажности почв и осадков ($r = 0,60$ и $0,82$), также на нее влияет и динамика ГТК ($r = 0,85$). От влажности почвы зависит и степень влияния особенностей почвенного покрова на урожайность ($r = -0,55$).

Увеличение осадков приводит к заметному снижению продуктивности трав 2 г. п. и к усилению ее пространственной вариабельности, при этом наблюдается возрастание влияния на нее экспозиции и характера почвенного покрова и, как следствие, суммы ландшафтных условий (табл. 2). В первой группе лет не обнаружено достоверного влияния метеофакторов на характер воздействия каких-либо структурных элементов ландшафта на урожайность трав. Во второй группе характер влияния экспозиции на продуктивность травостоя в определенной степени зависит от динамики ГТК ($r = 0,59$). Степени влияния суммы структурных частей на урожайность прямо пропорциональны осадкам ($r = 0,82$).

Минимальная дифференциация урожайности по группам лет отмечена на травах 3 г. п. Она также обусловлена некоторым усилением осадков и ростом ГТК, что приводит к незначительному росту влияния всех структурных элементов ландшафта на продуктивность (табл. 2). В первой и второй группах увеличение ГТК приводит к снижению влияния экспозиции склонов ($r = -0,54$) на вариабельность урожайности трав.

Все вышеизложенное позволяет усовершенствовать методологию создания ландшафтно-мелиоративных систем земледелия реальных хозяйств, основным моментом которой является прогнозирование урожайности культуры в конкретных природных условиях. Для этого, на основе мониторинговых наблюдений, проведенных на агроэкологическом стационаре, создается математическая модель продукционного процесса растения, которая, во-первых, позволяет определить факторы, наиболее сильно влияющие на урожайность культуры, а во-вторых, установить характер их влияния на урожайность. Зная особенности их пространственной вариабельности в пределах прогнозного хозяйства, близкого в ландшафтном отношении к условиям агроэкологического стационара, можно с помощью ГИС-технологий, на основе полученной математической модели, с определенной вероятностью предсказать урожайность культуры в его различных ча-

стях, что позволит адаптировать и другие элементы системы земледелия к его условиям.

Результаты выполненной работы показали, что математическая модель, разработанная на основе среднесуточных урожайных данных, не может адекватно прогнозировать урожайность культуры в пределах конкретного хозяйства. Различия групп лет наблюдений по многим параметрам заставляет рассматривать их как самостоятельные объекты в базе мониторинговых данных. При прогнозировании урожайности трав они должны быть использованы отдельно – для каждой группы годов должна создаваться собственная математическая модель, описывающая зависимость продуктивности от ландшафтных условий. Совокупность этих моделей позволит наиболее полно и корректно отразить динамику продуктивности трав в пределах прогнозного хозяйства.

Выводы. 1. Анализ полученных данных показывает, что на продуктивность трав в основном влияют особенности почвенного покрова (степень гидроморфизма почв), определяющие около 21 % пространственно-временной изменчивости урожайности, структурные особенности ландшафта (определяют почти 17 % вариабельности урожайности) и возраст травостоя (определяет в среднем от 14 до 16 % вариабельности урожайности). Учет этих обстоятельств при планировании мероприятий травосеяния в хозяйстве позволит получать высокие и устойчивые урожаи сена.

2. В процессе формирования пространственной вариабельности урожайности трав любого возраста доминирует микропестрота, зависящая от характера чередования пятен почв разной заболоченности (степени гидроморфизма). В меньшей степени изменчивость урожайности зависит от природных особенностей отдельных микроландшафтных выделов и менее всего на нее влияют условия отдельных склонов (около 6 %).

3. По мере старения травостоев наблюдается заметное увеличение влияния на пространственную вариабельность их продуктивности экспозиционного (с 3,4 до 8 %) и микроландшафтного (с 16 до 22 %) факторов и снижение влияния на нее особенностей почвенного покрова (с 24 до 18 %). Коэффициенты вариабельности суммарных влияний структурных частей ландшафта на урожайность трав 3 г. п. также заметно выше, что свидетельствует об их большей зависимости от агроклиматических условий. Наименее чувствительными к измене-

ниям агроклиматических условий травы 2 г. п., вследствие оптимального соотношения злаков и бобовых в их составе.

4. Степень влияния структурных особенностей агроландшафта на вариабельность урожайности трав в основном слабо зависит от изменчивости агроклиматических параметров. Выявлено, что динамика агроклиматических параметров заметно влияет лишь на зависимость пестроты урожайности от экспозиционного фактора (около 16 %). Характер зависимости урожайности трав 1 и 3 г. п. от экспозиции в значительной степени «подчиняется» временной динамике ГТК.

5. Разные группы лет наблюдений за урожайностью трав различного возраста отли-

чаются по продуктивности и характеру ее пространственно-временной вариабельности, а также по факторам, их определяющим, и по условиям, влияющим на эти факторы. Это заставляет, при процедуре прогнозирования урожайности трав разного возраста, создавать математические модели ее зависимости от ландшафтных условий для разных временных кластеров. При переносе результатов моделирования в условия реального хозяйства создаются прогнозные карты для конкретных агрометеобстановок. Совмещение этих карт в среде ГИС позволяет выявить прогнозные ареалы урожайности культуры, характеризующиеся определенной средней урожайностью и ее вариативностью во времени.

Список литературы

1. Bulgakov D. S., Rukhovich D. I., Shishkonakova E. A., Vil'chevskaya E. V. The application of the soil-agroclimatic index for assessing the agronomic potential of arable lands in the forest-steppe zone of Russia. *Eurasian Soil Science*. 2018;51(4):448-459. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229318040038>
2. Иванова Н. Н., Капсамун А. Д., Амбросимова Н. Н. Кормовая и средообразующая роль пастбищных травостоев в условиях осушаемых почв Центрального Нечерноземья. *Кормопроизводство*. 2019;(4):14-17. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37275406>
3. Иванов Д. А. Виды динамики состояния мелиорированных агроландшафтов. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2018;(4 (65)):4-18. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.65.4.04-18>
4. Базилевич Н. И., Гребенщиков О. С., Тишков А. А. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297 с. Режим доступа: <https://ru.b-ok.com/book/3141531/5cc35e>
5. Jiang P., Thelen K. D. Effect of Soil and Topographic Properties on Crop Yield in a North-Central Corn-Soybean Cropping System. *Agronomy Journal*. 2004;96(1):252-258. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0252>
6. Картамышев Н. И. О законе формирования плодородия почвы. *Земледелие*. 2000;(4):44-45.
7. Шарипов М. Г., Ишемьяров А. Ш., Тайчинов С. Н. Рельеф в системе качественной оценки земель. *Почвоведение*. 1978;(7):42-48.
8. Каштанов А. Н., Явтушенко В. Е. Агроэкология почв склонов. М.: Колос, 1997. 240 с.
9. Саввинова Е. Н. Агрономические особенности и продуктивность дерново-подзолистых почв на разных элементах рельефа. *Почвенно-агрономическое районирование и агрономическая характеристика почв основных районов СССР: научн. тр. Почвенного института им. В. В. Докучаева*. М.: Мысль, 1982. С. 38-48.
10. Балакшина В. И., Кононов М. Ф. Рельеф и урожайность сельскохозяйственных культур. *Земледелие*. 1998;(2):14-16.
11. Heil K., Heinemann P., Schmidhalter U. Modeling the Effects of Soil Variability, Topography, and Management on the Yield of Barley. *Front. Environ. Sci*. 2018;6:146. URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00146>
12. Романова Е. Н. Микроклиматическая изменчивость основных элементов климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 279 с.
13. Романова Е. Н., Мосолова Г. И., Береснева И. А. Микроклиматология и ее значение для сельского хозяйства. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 245 с.
14. Иванов Д. А., Ковалев Н. Г. Ландшафтно-мелиоративные системы земледелия (прикладная агрогеография): монография. Тверь: издатель А. Н. Кондратьев, 2017. 310 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009621352>
15. Иванов Д. А., Корнеева Е. М., Салихов Р. А., Петрова Л. И., Пугачева Л. В., Рублюк М. В. Создание ландшафтного полигона нового поколения. *Земледелие*. 1999;(6):15-16.

References

1. Bulgakov D. S., Rukhovich D. I., Shishkonakova E. A., Vil'chevskaya E. V. The application of the soil-agroclimatic index for assessing the agronomic potential of arable lands in the forest-steppe zone of Russia. *Eurasian Soil Science*. 2018;51(4):448-459. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229318040038>
2. Ivanova N. N., Kapsamun A. D., Ambrosimova N. N. *Kormovaya i sredoobrazuyushchaya rol' pastbishnykh travostoev v usloviyakh osushayemykh pochv Tsentral'nogo Nечernozem'ya*. [Forage and environment-forming potential of pasture grasses on the drainage land of the Central Non-chernozem region]. *Kormoproduktivost* = Forage Production. 2019;(4):14-17. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37275406>

3. Ivanov D. A. *Vidy dinamiki sostoyaniya meliorirovannykh agrolandshaftov*. [Types of dynamics of the state of meliorated agrolandscapes]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2018;(4 (65)):4-18. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.65.4.04-18>
4. Bazilevich N. I., Grebenshchikov O. S., Tishkov A. A. *Geograficheskie zakonomernosti struktury i funktsionirovaniya ekosistem*. [Geographic patterns of the structure and functioning of ecosystems]. Moscow: Nauka, 1986. 297 p. URL: <https://ru.b-ok.com/book/3141531/5cc35e>
5. Jiang P., Thelen K. D. Effect of Soil and Topographic Properties on Crop Yield in a North-Central Corn-Soybean Cropping System. *Agronomy Journal*. 2004;96(1):252-258. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0252>
6. Kartamyshev N. I. *O zakone formirovaniya plodorodiya pochvy*. [On the law of the formation of soil fertility]. *Zemledelie*. 2000;(4):44-45. (In Russ.).
7. Sharipov M. G., Ishem'yarov A. Sh., Taychinov S. N. *Rel'ef v sisteme kachestvennoy otsenki zemel'*. [Relief in the land quality assessment system]. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 1978;(7):42-48. (In Russ.).
8. Kashtanov A. N., Yavtushenko V. E. *Agroekologiya pochv sklonov*. [Agroecology of slope soils]. Moscow: Kolos, 1997. 240 p.
9. Savvinova E. N. *Agronomicheskie osobennosti i produktivnost' dernovo-podzolistykh pochv na raznykh elementakh rel'efa*. [Agronomic features and productivity of sod-podzolic soils on different relief elements]. *Pochvenno-agronomicheskoe rayonirovanie i agronomicheskaya kharakteristika pochv osnovnykh rayonov SSSR: nauchn. Tr. Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva*. [Soil-agronomic zoning and agroecological characteristics of soils in the main regions of the USSR: Scientific works of the Soil Science Institute. V. V. Dokuchaev]. Moscow: Mysl', 1982. pp. 38-48.
10. Balakshina V. I., Kononov M. F. *Rel'ef i urozhaynost' sel'skokhozyaystvennykh kul'tur*. [Relief and productivity of agricultural crops]. *Zemledelie*. 1998;(2):14-16. (In Russ.).
11. Heil K., Heinemann P., Schmidhalter U. Modeling the Effects of Soil Variability, Topography, and Management on the Yield of Barley. *Front. Environ. Sci*. 2018;6:146. URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00146>
12. Romanova E. N. *Mikroklimaticheskaya izmenchivost' osnovnykh elementov klimata*. [Microclimatic variability of the main elements of the climate]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 279 p.
13. Romanova E. N., Mosolova G. I., Beresneva I. A. *Mikroklimatologiya i ee znachenie dlya sel'skogo khozyaystva*. [Microclimatology and its importance for agriculture]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. 245 p.
14. Ivanov D. A., Kovalev N. G. *Landshaftno-meliorativnye sistemy zemledeliya (prikladnaya agrogeografiya): monografiya*. [Landscape-reclamation systems of agriculture (applied agrogeography): monograph]. Tver': izdatel' A. N. Kondrat'ev, 2017. 310 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009621352>
15. Ivanov D. A., Korneeva E. M., Salikhov R. A., Petrova L. I., Pugacheva L. V., Rublyuk M. V. *Sozdanie landshaftnogo poligona novogo pokoleniya*. [Creation of a new generation landscape polygon]. *Zemledelie*. 1999;(6):15-16. (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ **Иванов Дмитрий Анатольевич**, доктор с.-х. наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, ФИЦ «Почвенный институт им. В. В. Докучаева», д. 7, стр. 2, Пыжевский пер., г. Москва, Российская Федерация, 119017, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2588-272X>, e-mail: volok234@yandex.ru

Карасева Ольга Васильевна, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник, ФИЦ «Почвенный институт им. В. В. Докучаева», д. 7, стр. 2, Пыжевский пер., г. Москва, Российская Федерация, 119017, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8377-6386>

Рублюк Мария Владимировна, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник, ФИЦ «Почвенный институт им. В. В. Докучаева», д. 7, стр. 2, Пыжевский пер., г. Москва, Российская Федерация, 119017, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5319-2614>

Information about authors

✉ **Dmitry A. Ivanov**, DSc in Agricultural science, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, professor, chief researcher, Federal Research Centre V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, 7, bld. 2, Pyzhevsky per., Moscow, Russian Federation, 119017, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2588-272X>, e-mail: volok234@yandex.ru

Olga V. Karaseva, PhD in Agricultural science, senior researcher, Federal Research Centre V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, 7, bld. 2, Pyzhevsky per., Moscow, Russian Federation, 119017, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8377-6386>

Maria V. Rublyuk, PhD in Agricultural science, senior researcher, Federal Research Centre V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, 7, bld. 2, Pyzhevsky per., Moscow, Russian Federation, 119017, e-mail: 2016vniimz-noo@list.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5319-2614>

✉ – Для контактов / Corresponding author