

Земледелие и мелиорация

УДК 631.5;631.6;911.2

DOI 10.31857/S2500262725020016 EDN DDWZNC

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ РЖИ НА ЗЕМЛЯХ, ВЫБЫВШИХ ИЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ОБОРОТА

© 2025 г. **Д. А. Иванов**, доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН, **С. В. Архипов**, кандидат физико-математических наук, **О. Н. Анциферова**, кандидат сельскохозяйственных наук, **К. С. Курпас**

Федеральный исследовательский центр
«Почвенный институт им. В. В. Докучаева»,
119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2
E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

Исследования проводили с целью сравнения пригодности двух математических методов для процедуры прогнозирования урожайности озимой ржи в пределах заброшенных земель. Обучающим множеством для настройки прогностических моделей (регрессионного и нейросетевого анализа) послужили результаты длительного мониторинга урожайности озимой ржи на агроэкологической трансекте, заложенной в пределах конечно-моренного холма вблизи г. Тверь. Уравнения регрессии и перцептроны, полученные для разных климатических обстановок, описывающие зависимость урожайности ржи от ландшафтных условий, были применены для прогнозирования ее продуктивности в условиях заброшенных земель, расположенных в том же регионе. Разработанные прогнозы на основе регрессионных и нейросетевых моделей различаются только в деталях. Карты прогнозной урожайности озимой ржи, созданные на основе различных математических подходов, свидетельствуют о пригодности изучаемой территории для выращивания этой культуры, прогнозная средневзвешенная урожайность которой в ее пределах варьирует от 1,52 до 2,61 т/га. Оптимальное местоположение для размещения посевов ржи на основании карты, созданной по результатам прогнозирования, – ландшафт моренно-ледниковой равнины, а ареалы, неблагоприятные для выращивания этой культуры, располагаются в пределах зандровой равнины и долины р. Волга. Для целей адаптивно-ландшафтного земледелия Нечерноземья необходимо рекомендовать совместное использование регрессионного и нейросетевого анализа для получения наиболее достоверных и информативных прогнозов. Создание карт прогнозной урожайности озимой ржи в пределах заброшенного участка на основе архивных данных имеет не только методологический, но и прикладной смысл, так как эта процедура позволяет оценить его пригодность к выращиванию культуры и тем самым ответить на вопрос о целесообразности проведения дорогостоящих экспедиционных исследований.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF FORECASTING WINTER RYE YIELD ON LANDS WITHDRAWN FROM AGRICULTURAL CULTIVATION

D. A. Ivanov, S. V. Arkhipov, O. N. Antsiferova, K. S. Kurpas

Federal Research Center «Dokuchaev Soil Science Institute»,
119017, Moskva, Pyzhevskii per., 7, str. 2
E-mail: 2016vniimz-noo@list.ru

The study was conducted to compare the suitability of two mathematical methods for the procedure of forecasting the winter rye yield within abandoned lands. The training set for adjusting the forecast models (regression and neural network analyses) was the results of long-term monitoring of the winter rye yield on an agroecological transect laid within a terminal moraine hill near the city of Tver. The regression equations and perceptrons obtained for different climatic conditions, describing the dependence of rye yield on landscape conditions, were used to forecast its productivity in abandoned lands located in the same region. The developed forecasts based on regression and neural network models differ only in details. Maps of the forecast winter rye yield, created on the basis of various mathematical approaches, indicate the suitability of the studied territory for growing this crop – its forecast average weighted yield within its limits fluctuates from 1.52 to 2.61 t/ha. The optimal location for rye crops based on the map created based on the forecast results will be the landscape of the moraine-glacial plain, and areas unfavorable for growing this crop are located within the outwash plain and the Volga River valley. For the purposes of adaptive landscape farming in the Non-Black Earth Region, it is necessary to recommend the combined use of regression and neural network analysis to obtain the most reliable and informative forecasts. The creation of maps of the predicted yield of winter rye within the boundaries of an abandoned site based on the available archival data has not only a methodological but also an applied meaning, since this procedure allows us to assess its suitability for growing this crop and, thus, answer the question of the advisability of conducting expensive expeditionary research on it.

Ключевые слова: адаптивно-ландшафтные системы земледелия, мониторинг, прогноз, регрессионный анализ, нейронные сети.

Keywords: adaptive landscape farming systems, monitoring, forecast, regression analysis, neural networks.

Проблема заброшенных земель в Российской Федерации становится все более актуальной вследствие экономических, экологических и политических причин. Сокращение площадей обрабатываемых земель в нашей стране началось еще в начале двадцатого века, усилилось в советские годы, а при переходе к рыночной экономике приобрело значительные масштабы [1, 2, 3]. Согласно

постановлению Правительства Российской Федерации от 14 мая 2021 г. № 731, за период с 2010 по 2020 г. площадь земель сельскохозяйственного назначения уменьшилась на 17,6 млн га (на 4,6 %), также по состоянию на 2021 г. 19,4 млн га пашни (5,1 %) остаются неиспользуемыми. Во исполнение этого постановления была запущена «Государственная программа эффективного

вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения ...».

Главной задачей при вовлечении заброшенных земель в сельскохозяйственный оборот выступает оценка их потенциальных возможностей для выращивания культур. Она проводится на основе прогнозирования урожайности в условиях вовлекаемой в оборот территории, которая может иметь различный производственный потенциал как в технологическом и конъюнктурном, так и в агроэкологическом отношении. На основе оценки этого потенциала возможно выделение категорий заброшенных земель по перспективности их освоения – устойчиво эффективных, неустойчиво эффективных и неэффективных и разработка для них рекомендаций по дальнейшему использованию [4].

Прогнозирование урожайности растений – одна из наиболее сложных проблем научной агрономии. Традиционный ее прогноз, опирающийся на изучение состояния посевов в определенные сроки и влияния на них почвенно-ландшафтных и климатических условий, предназначен для оценки будущего урожая на конкретном поле [5]. Для количественного учета влияющих на его размеры факторов необходимо периодическое измерение параметров абиотической и биотической среды поля. Поэтому математические модели прогнозирования, работающие на прямом трудоемком измерении набора показателей состояния посевов и ландшафтных условий, пока не получили большого распространения в реальном производстве [6, 7, 8].

Сельскохозяйственное использование заброшенных земель необходимо вести на основе адаптивно-ландшафтных подходов, обеспечивающих экологически обусловленное размещение посевов культур, способствующее раскрытию биологического потенциала растений и затуханию деградиационных процессов в ландшафте [9, 10]. В режиме адаптивно-ландшафтной системы земледелия (АЛСЗ) также требуется применение прогнозных процедур для адаптации агротехнических приемов к условиям агроландшафта. Они должны давать возможность строить пространственные модели изменения урожайности культуры в пределах реального поля (хозяйства), что позволит определять оптимальные местоположения посевов, а также характер использования агротехнических приемов в конкретных местоположениях [11, 12].

В основу проектирования системы земледелия положен учет метеоусловий [13]. Воздействие погоды на урожайность проявляется в сложной системе временных и пространственных факторов, во многом определяющих направленность динамических процессов в агрогеокомплексе [14]. При этом известно влияние ландшафтных условий на характер пространственного перераспределения термических ресурсов и сложность взаимодействия энергии и пространства в процессе образования растительной биомассы [15, 16]. Информация об особенностях адаптивных реакций растений на смену ландшафтной и климатической обстановки, главным инструментом выявления которых служит долговременный мониторинг их произрастания в пределах опытного участка, – основа разработки проекта АЛСЗ генетически однотипной с опытным полигоном территории. В ходе статистической обработки данных этого мониторинга можно выявить факторы, влияющие на продукционный процесс в различных территориальных выделах, и создать математические модели, описывающие адаптивные реакции растений на изменчивость природной среды. На основе таких моделей и ГИС-технологий можно спрогнозировать «поведение» культуры (ее урожай-

ность) в пределах заброшенных земель, расположенных в аналогичных с полигоном ландшафтных условиях на базе имеющихся на них архивных данных. Анализ карт прогнозной урожайности выявит места с различными агроэкологическими и технологическими потенциалами, что позволит решить вопрос о перспективах их освоения [17].

Наиболее актуально прогнозирование урожайности зерновых как важнейших культур для питания человека и животных. Учет мероприятий по выращиванию озимой ржи играет существенную роль в конструировании севооборотов, структуры посевных площадей и общей направленности проектирования АЛСЗ [18, 19]. Озимая рожь (*Secale cereale* L.) относится к озимым хлебам I группы и выступает одной из основных зерновых культур России. Из ржаной муки изготавливают различные сорта хлеба, отличающиеся калорийностью и хорошими вкусовыми качествами, содержащие полноценные белки и витамины. Более 80 % посевных площадей под этой культурой сосредоточено в Нечерноземье. Озимая рожь особенно важна для северных регионов страны, где преобладают малоплодородные кислые почвы, а погодные условия часто неблагоприятны для растениеводства. Во многих странах мира рожь в качестве первой культуры эффективно используют для освоения заброшенных и малоплодородных земель [20].

Цель исследований – выявить методологические аспекты прогнозирования урожайности озимой ржи различными математическими методами и оценить на основе прогноза пригодность заброшенных земель для ее выращивания.

Методика. В работе выполняли прогнозирование урожайности озимой ржи для условий ликвидированного хозяйства в Тверской области на основе результатов многолетнего (1998–2024 гг.) мониторинга урожайности озимой ржи сорта Дымка на агрополигоне «Губино» ВНИИМЗ и использования архивных данных по хозяйству. Агрополигон расположен в пределах конечно-моренного холма в 4-х км к востоку от г. Тверь. Холм, с относительной высотой 15 м, состоит из плоской вершины, северного, крутизной 2...3°, и южного (3...5°) склонов и межхолмных депрессий (северной и южной). Почвенный покров – вариация-мозаика дерново-подзолистых глееватых и глеевых почв, образованная на двучленных отложениях – песчано-супесчаная толща в пределах почвенного профиля на разной глубине подстилается легко и среднесуглинистой закамененной мореной. На юге полигона мощность кроющего флювиогляциального наноса местами превышает 1,5 м – почвы здесь преимущественно песчаные. На вершине и северном склоне холма поверхностные горизонты сложены супесью и иногда легким суглинком, мощность кроющего наноса здесь составляет около 1 м, а в депрессии на севере морена изредка выходит на дневную поверхность.

Наблюдения проводили на агроэкологической трансекте (физико-географическом профиле) – массиве, пересекающем все микро-ландшафтные позиции (подурочища) конечно-моренного холма: транзитно-аккумулятивные депрессии; транзитные средних частей склонов; элювиально-транзитные верхних частей склонов; элювиально-аккумулятивные вершины. Трансекта состоит из десяти параллельных полос-полей, каждая из которых занята определенной культурой. В пределах конкретной полосы антропогенное воздействие одинаково, что позволяет изучать влияние ландшафтных условий на культуры в наименее искаженном виде. Поля имеют ширину 7,2 м, длину – 1300 м. Урожайность ржи опреде-

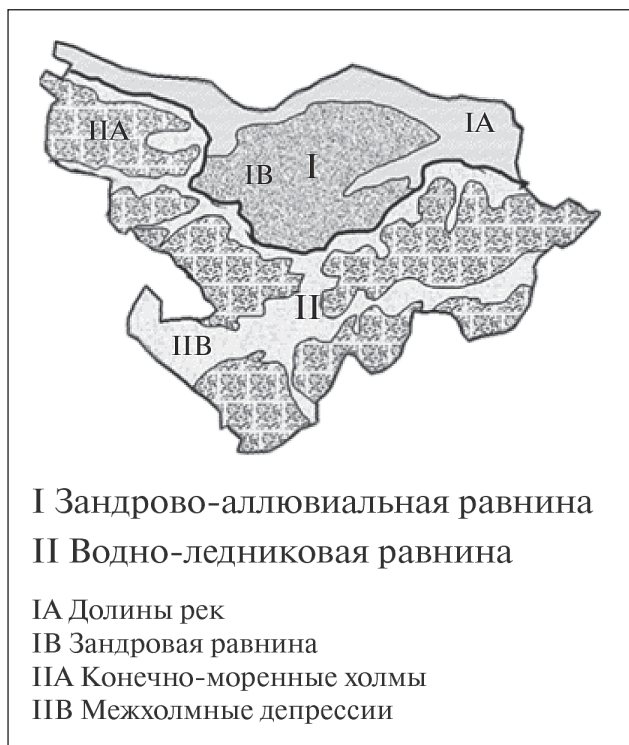


Рис. 1. Карта-схема ландшафтного устройства ОПХ «Заветы Ленина».

ляли прямым комбайнированием в 120-и точках, регулярно расположенных вдоль трансекты на расстоянии 10 м одна от другой. Размер учетной площадки – 20 м². Под рожь удобрения не вносили (экстенсивная технология), за исключением подкормки в фазе кущения аммиачной селитрой в дозе по физической массе 1 ц/га. Для прогнозирования урожайности ржи исследовали влияние на нее факторов рельефа (абсолютной высоты, крутизны и кривизны поверхности, интенсивности солнечной радиации) и агрохимических свойств почвы (содержание гумуса (по Тюрину), подвижных фосфора и калия (по Кирсанову), pH_{KCl}), определяемых в ранее перечисленных точках опробования, так как только эти параметры были известны для территории прогнозного хозяйства (ОПХ «Заветы Ленина», Калининский район Тверской области). Для изучения влияния погодных условий на урожай культуры использовали архивные данные метеостанции г. Тверь.

Прогнозное хозяйство, где размещен агрополигон «Губино», прекратило хозяйственную деятельность в конце 90-х гг. и было юридически ликвидировано в 2006 г. Общая его площадь составляла 6312 га, сельхозугодий – 4923 га, в том числе пашни – 3394 га. Территория ОПХ в агроэкологическом отношении может быть поделена на две части (рис. 1).

Долинный ландшафт на севере хозяйства, занимающий 29,2 % его площади, образован русловыми процессами. Рельеф его плоский, осложненный останцами грядистых зандров, сложенных аллювиальными отложениями различного возраста и гранулометрического состава, занятых сосновым бором (I). Доминантная местность – современная долина р. Волги (IA). Субдоминантная местность – древнеаллювиальная (зандровая) плоская равнина, сложенная слоистыми песками различной крупности, на разной глубине подстилаемыми карбонатной мореной (IB).

Ландшафт моренно-ледниковой равнины, занимающий центральные и южные части хозяйства, образован водноледниковыми процессами (II). Он расположен на 70,8 % площади ОПХ. Рельеф его волнисто-увалистый, с перепадами высот до 30 м. Почвообразующие породы – двучлены разной мощности, образованные флювиогляциальными песками и супесями, подстилаемыми завалуненной карбонатной мореной. Ландшафт образован одной местностью волнисто-увалистой равнины, которая состоит из сложных урочищ моренных холмов (ПА). Доминантными подурочищами здесь служат транзитные геокомплексы, субдоминантными – транзитно-аккумулятивные геосистемы (ПВ).

Агроэкологическая трансекта, расположенная в полосе перехода моренно-ледниковой равнины к доливному геокомплексу, генетически однотипна ландшафтам, составляющим территорию ОПХ.

На основании архивных материалов ОПХ и ВНИИМЗ (материалы обследования Тверского филиала института «ЦентрНИИГИПРОЗЕМ», Института «Тверьгипропроводхоз», Государственного центра агрохимической службы «Тверской», данных по опытным участкам ВНИИМЗ) были составлены цифровая модель рельефа (ЦМР) хозяйства, агрохимические картограммы, почвенные и ландшафтные карты. В пределах ОПХ выбрана 61 равномерно расположенная опорная точка, для каждой из которых определены все ранее перечисленные параметры.

В процессе исследований использовали кластерный, дисперсионный, регрессионный, нейросетевой методы статистического анализа, а также приемы описательной статистики. Пространственные исследования и результаты их визуализации выполнены в среде ГИС. Статистическую и графическую обработку данных мониторинга и прогноз осуществляли с использованием пакетов программ Statgraphic+19, Excel 19 и геоинформационной системы ArcGIS 10. Степень влияния ландшафтных факторов на урожайность ржи рассчитывали на основе метода Н. А. Плохинского [21] путем деления частной факториальной суммы квадратов на общую.

Результаты и обсуждение. Начальным этапом обработки массива данных долговременного мониторинга урожайности озимой ржи выступает его структуризация – выделение групп достаточно однородных значений. Ее выполняли методом кластеризации (рис. 2).

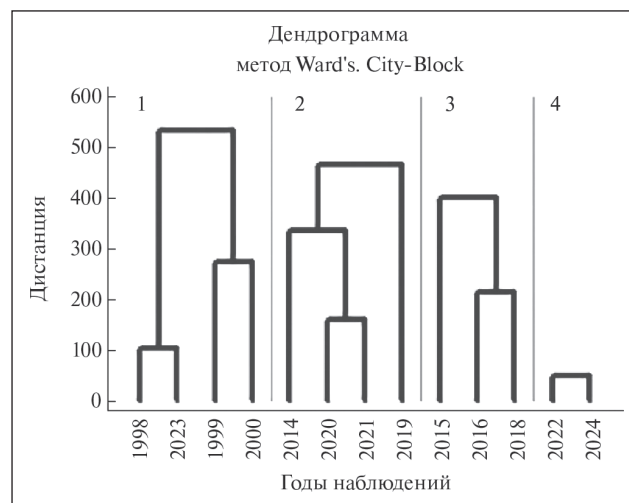


Рис. 2. Результаты кластеризации данных по урожайности озимой ржи на агроэкологической трансекте по годам наблюдения (1...4 номера кластеров).

Озимую рожь в период с 1998 по 2024 г. выращивали не каждый год – наблюдения за растениями осуществляли в 1998–2000 и 2014–2024 гг., при этом в 2017 г. произошла гибель посевов вследствие неудачной перезимовки. Годы наблюдений разделились на 4 кластера по характеру пространственной вариабельности урожайности культуры в пределах трансекты, которая отражает трансформацию климатической обстановки в пределах Нечерноземья. Характерно, что с увеличением номера кластера происходило усиление связи между входящими в него годами, что также, вероятно, обусловлено изменением климата.

На основе мультирегрессионного анализа для каждого кластера были выявлены закономерности формирования урожайности ржи в пределах трансекты. Уравнения регрессии показывают, как рассматриваемые факторы ландшафтной среды влияют на усредненные, в пределах кластера, величины урожайности культуры. Они могут служить моделями, на основе которых, с некоторой вероятностью, можно спрогнозировать урожайность культуры в пределах ОПХ для конкретной климатической обстановки.

Для условий первого кластера прогностическая регрессионная модель выглядит следующим образом:

$$\text{Урожай} = -96,497 + 0,812006 \text{Высота} + 0,0444461 \text{Фосфор} - 1,95195 \text{Гумус} \quad (1)$$

$$R^2 = 42,2 \%, p = 0,005.$$

Из восьми переменных, задействованных в расчете, достоверно на урожайность ржи в первом кластере влияли только три – положительное воздействие на размеры урожая оказывали высота местоположения и содержание подвижного фосфора в почве, тогда как содержание гумуса, который, как правило, концентрируется в понижениях, было обратно пропорционально величине результирующего показателя. Модель объясняет менее половины дисперсии урожайности – на ее основе можно воссоздать только самые общие черты пространственного распределения.

Прогноз урожайности для второго кластера можно рассчитать на основе следующего выражения:

$$\text{Урожай} = -74,0473 + 0,715856 \text{Высота} - 33,7848 \text{Кривизна} - 16,0661 \text{Крутизна} \quad (2)$$

$$R^2 = 26,6 \%, p = 0,008.$$

Из уравнения (2) видно, что максимальную урожайность озимой ржи в этих условиях можно получить на высоких, ровных и плоских поверхностях. Прогностическая способность модели невысока, агрохимические параметры почвы в ней не играют существенной роли, поэтому карты урожайности, созданные на основе этой модели, дают только самое общее представление о топографии посева ржи.

Пространственная вариабельность урожая в условиях третьего кластера описывается следующим уравнением:

$$\text{Урожай} = 27,9071 + 0,161179 \text{Фосфор} - 1,07745 \text{Калий} + 2,22754 \text{Гумус} \quad (3)$$

$$R^2 = 33,9 \%, p = 0,001.$$

Прогностическая поверхность урожая в этом случае зависит только от агрохимических свойств почвы – максимальный сбор зерна культуры будет зафиксиро-

ван на легких почвах с высоким содержанием гумуса и фосфора. Калий, маркирующий суглинистые породы, обратно пропорционально связан с урожайностью. Модель объясняет треть пространственной дисперсии урожая и может рассматриваться только как рекогносцировочная.

Для четвертого кластера прогностическое уравнение представлено в следующем виде:

$$\text{Урожай} = -830,149 + 0,650699 \text{Высота} + 0,00193236 \text{Радияция} + 5,8529 \text{pH} + 0,121126 \text{Калий} \quad (4)$$

$$R^2 = 41,0 \%, p = 0,000$$

Наибольшие урожаи ржи в условиях четвертого кластера можно получить на высоких, хорошо прогреваемых поверхностях, почвы которых имеют слабокислую реакцию и обогащены подвижным калием. Точность модели позволяет создать обзорную карту урожайности, что дает определенные возможности для оценки ресурсного потенциала территории.

В условиях первого кластера урожайность озимой

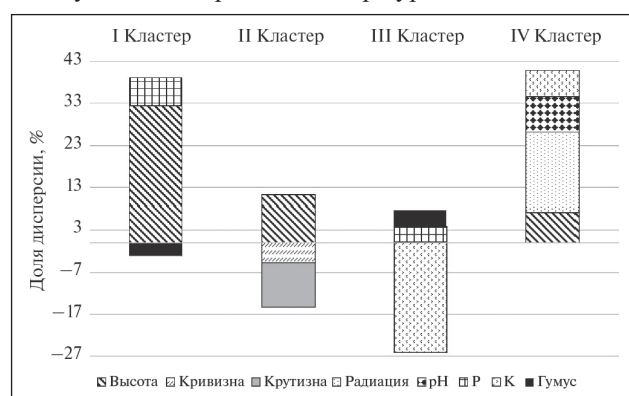


Рис. 3. Степени воздействия факторов на урожайность озимой ржи в условиях разных кластеров.

ржи в основном зависит от высоты местоположения, вторая группа лет характеризуется тем, что степень влияния варьирования гипсометрических отметок местности на урожай соизмерима с воздействием на него пестроты крутизны склонов (рис. 3). В условиях третьего кластера урожайность озимой ржи в основном зависит от гранулометрического состава почвы, а в четвертой совокупности лет характерно доминирование при продуцировании биомассы прогрева территории.

Отличительной особенностью моделей на основе нейросетевого анализа служит нелинейная структура зависимости выходной служебной от объясняющих факторов. Основным элементом сети выступает нейрон, на вход которого подается сигнал

$$Y_j = \sum w_i X_i + b_i \quad (5)$$

где w_i – весовые коэффициенты, b_i – смещение, X_i – входные сигналы.

Затем применяется функция активации $f(Y_i)$, преобразующая Y_i в выходной сигнал. В нашем случае производили нормализацию исходных данных на отрезок $[0,1]$ с использованием нормировки min-max, а функцией активации служила сигмоида

$$f(x) = 1/(1+\exp(-x)). \quad (6)$$

В процессе построения модели урожайности использовали перцептроны с одним или двумя скрытыми слоями. Эмпирически было проверено, что увеличение количества скрытых слоев ухудшает качество модели.

Программным средством реализации была выбрана статистическая среда R [22], выступающая безусловным лидером среди некоммерческих систем статистического анализа и имеющая огромное количество специализированных пакетов.

Для построения нейросетей применяли функцию `neuralnet` из одноименного пакета, в которой задемпировали параметры, задаваемые по умолчанию. Для вычисления весов w_i использовали метод устойчивого обратного распространения ошибок с обратным отслеживанием весов `grprop+`, а в качестве функционала ошибок вычислений выбирали сумму их квадратов.

Процесс выбора оптимальной сети реализован следующим образом. Исходная выборка с использованием датчика случайных чисел разбивается на обучающую (75 % элементов всей выборки) и тестирующую. Затем для каждой сети с одним или двумя скрытыми слоями происходит пятикратный процесс обучения на первой выборке. Он состоит в вычислении оптимальных весов w_i для каждого нейрона наиболее быстродействующим градиентным методом `grprop+`. Затем построенные сети применяются для прогнозирования выходного сигнала в тестирующей выборке и вычисляется MSE – средний квадрат отклонений наблюдаемых и предсказанных значений выходной переменной.

Оптимальной считается нейросеть, имеющая наименьшую величину среднего значения квадратов ошибок MSE по всем пяти итерациям. Параллельно с построением нейросетей для каждой случайной выборки строится многомерная регрессионная модель, которая только в единичных случаях показывает меньшую MSE. Обычно нейросеть имеет MSE в несколько раз меньше, чем у регрессии.

Последним этапом служит применение полученной таким образом оптимальной сети для всей выборки каждого кластера. Значения MSE для кластеров 1...4 составили 8,395; 23,424; 7,395; 5,681 соответственно.

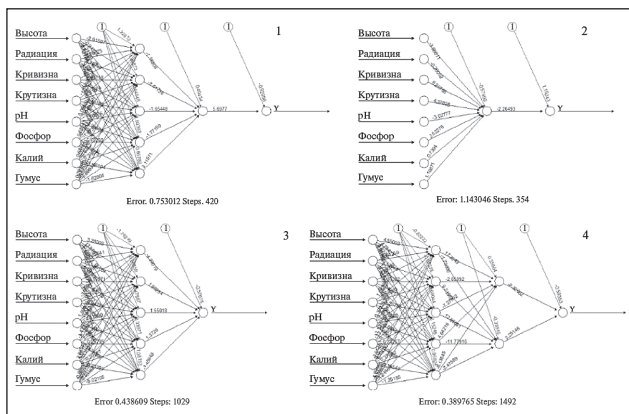


Рис. 4. Оптимальные нейросети для каждого кластера (1...4 – номера кластеров).

Дальнейшие шаги по построению оптимальной нейронной сети состоят в использовании альтернативных: функций активации, способов масштабирования, методов вычисления весов, функционалов ошибок, критериев для выбора оптимальной сети.

Оптимальные, наиболее полно описывающие пространственное колебание урожайности ржи, перцептроны, для каждого кластера имеют индивидуальные

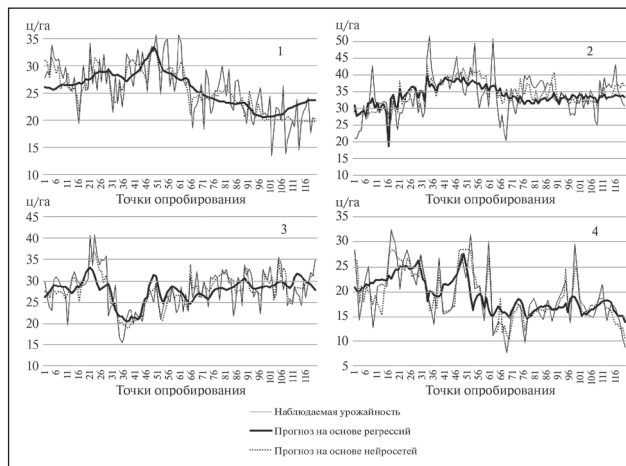


Рис. 5. Пространственная динамика реальной и прогнозной урожайности ржи в пределах агроэкологической трансекты для разных кластеров (1...4 – номера кластеров).

черты (рис. 4). Так, нейросеть, описывающая урожайность во втором кластере, имеет относительно простую архитектуру и наибольшую ошибку, в то время как перцептрон для четвертого кластера наиболее сложен и точен. Это в некоторой степени совпадает с результатами регрессионного анализа.

Для сравнения прогностических возможностей разных математических подходов нами обоими методами были рассчитаны прогнозные значения урожайности на трансекте для каждого кластера. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что, во-первых, реальная урожайность культуры подвержена значительным пространственным колебаниям; во-вторых, регрессионные модели описывают изменения только пространственного тренда урожайности, в то время как модели, основанные на нейросетях, фиксируют и многие ее пространственные флуктуации (рис. 5).

Результаты корреляционного анализа между реальными и прогностическими данными для каждого кластера свидетельствуют о следующем: во-первых, коэффициенты корреляции достоверны для всех случаев (для 120 пар измерений достоверны коэффициенты со значениями $>0,16$); во-вторых, во всех кластерах совпадение реальных данных лучше с прогнозом, рассчитанным на основе нейросетевого анализа; в-третьих, условия кластеров сильно влияют на коэффициенты корреляции реальных данных и прогноза – для второго кластера оба математических метода дают наименее точный прогноз (рис. 6).

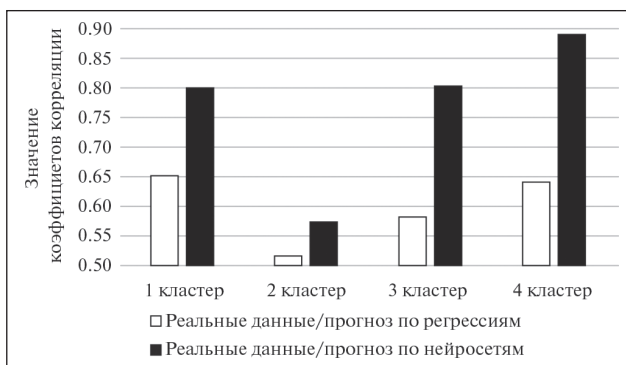


Рис. 6. Результаты кластерного анализа реальных и прогностических данных урожайности на трансекте.

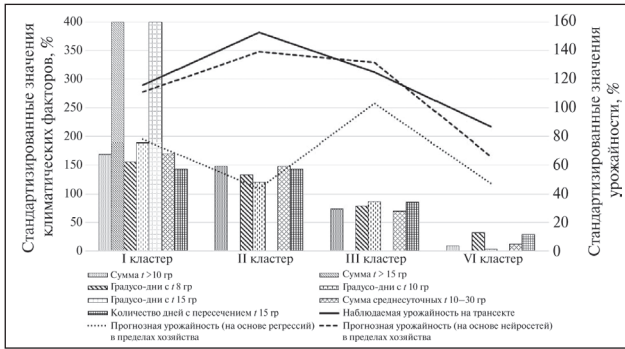


Рис. 7. Климатические условия, реальная (для трансекты) и прогностическая (для хозяйства) продуктивность ржи в условиях различных кластеров.

Использование архивных данных метеостанции позволило выявить индивидуальные черты агроклимата кластеров (рис. 7).

Анализ этого рисунка свидетельствует о том, что в климатическом отношении кластеры различаются в основном по количеству термических ресурсов – значения всех представленных параметров понижаются от первого кластера к четвертому. Максимальная урожайность на трансекте (3,4 т/га) зафиксирована для второго кластера, который можно определить как оптимальный по климатическим условиям. Для первого кластера, который можно назвать «жарким», средняя реальная урожайность ржи составляет 2,6 т/га, для третьего, «прохладного», кластера она равна 2,8 т/га, а для четвертого, «холодного», – 1,9 т/га. Средняя для всех лет наблюдений урожайность на трансекте равна 2,7 т/га. Все кластеры достоверно различаются по реальной урожайности ржи ($НСР_{0,05} = 0,17$ т/га).

Средние значения прогностической урожайности для трансекты не отличаются от вышеприведенных (см. рис. 5).

Средняя прогнозная урожайность по хозяйству (для 61 точки), вычисленная на основе регрессионных уравнений 1...4, составляет 1,5 т/га, что существенно ниже урожайности по трансекте. Максимальная урожайность получена для третьего «прохладного» кластера (2,3 т/га), минимальная – для второго (1,0 т/га) и чет-

вертого (1,1 т/га) кластеров. В жаркую погоду регрессионная модель предсказывает среднюю урожайности по хозяйству, равную 1,7 т/га. Урожайность второго и четвертого кластеров достоверно не различается.

Среднее значение прогнозной урожайности по хозяйству, рассчитанное с использованием нейросетей, равно 2,5 т/га, что гораздо ближе к средней по трансекте. Максимальная урожайность прогнозируется для оптимального и «прохладного» кластеров (3,1 и 2,9 т/га соответственно). В жаркую погоду прогноз с использованием нейросетей предсказывает среднюю урожайность по хозяйству, равную 2,5 т/га, а в холодную – 1,5 т/га. Различия по всем кластерам достоверны ($НСР_{0,05} = 0,2$ т/га). В целом, временная динамика колебания реальной урожайности на трансекте ближе к предсказанной для условий хозяйства на основе нейросетей, чем регрессионных моделей.

На основе данных, полученных с использованием регрессионных и нейросетевых моделей, в среде ГИС были созданы карты средневзвешенной (по вероятности возникновения климатических обстановок) прогнозной урожайности хозяйства, которые показывают, что ее прогнозные значения для ОПХ при регрессионном моделировании ниже, чем рассчитанное на основе нейросетей (1,52 и 2,61 т/га соответственно). Были получены также карты коэффициентов вариабельности урожайности, анализ которых показал, что при регрессионном прогнозировании пространственная изменчивость урожая значительно выше (55,5 %), чем при нейросетевом (24,0 %). При сопоставлении этих карт сформированы синтетические карты условий культивирования ржи в пределах прогнозного хозяйства, рассчитанных на основе конкретного метода прогнозирования (рис. 8).

Сравнение их показывает, что способ прогнозирования не приводит к принципиальным различиям в закономерностях распределения ареалов пригодности для возделывания озимой ржи: расчеты на основе обоих методов показали, что благоприятными свойствами для выращивания культуры характеризуются незначительные по площади территории (от 4 до 19 %), в пределах которых можно ожидать наиболее высокую и устойчивую во времени продуктивность ржи (>3 т/га). Площади, характеризующиеся посредственными (с низкой, но устойчивой, либо с высокой, но неустойчивой

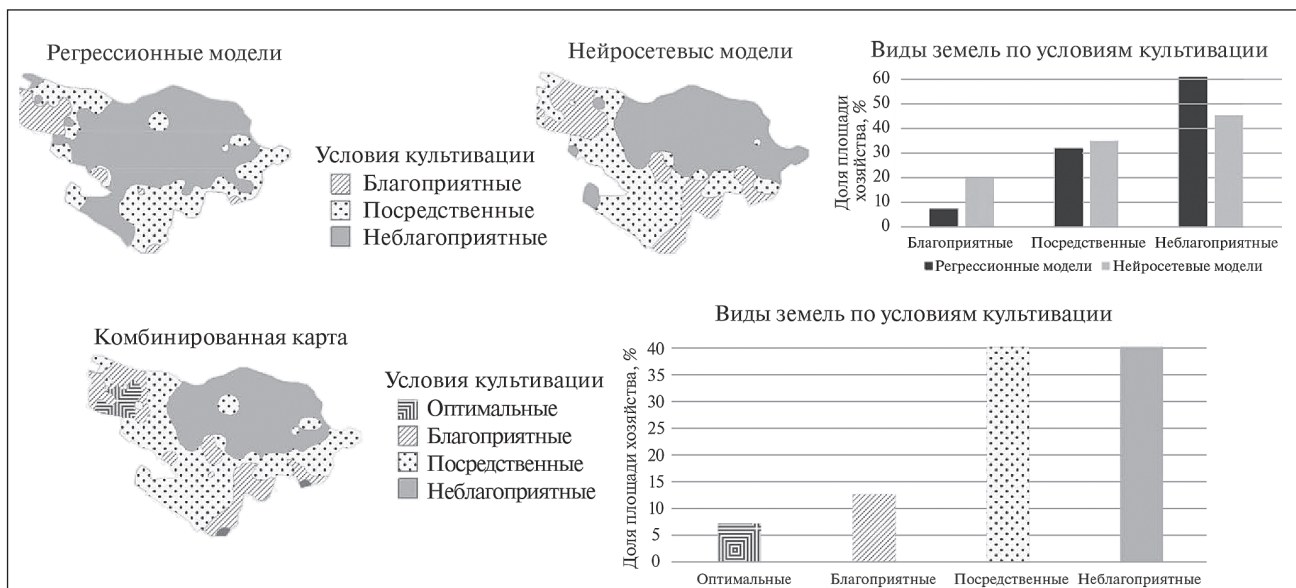


Рис. 8. Районирование территории хозяйства по степени пригодности к выращиванию озимой ржи на основе разных прогностических процедур.

урожайностью) занимают гораздо большие площади (30...32 %). Около половины территории хозяйства занято пространствами с неблагоприятными условиями выращивания ржи – в их пределах прогнозируется низкий урожай (1...2 т/га), существенно меняющийся год от году. Прогноз, созданный на основе нейросетей, предсказывает более благоприятную ситуацию для культивации ржи.

Закономерности пространственного расположения площадей также принципиально не отличаются в зависимости от метода прогноза. На карте, созданной на основе регрессионного моделирования, территории, оптимальные для выращивания ржи, располагаются на западе и частично на юге и юго-востоке хозяйства – в пределах водно-ледниковой равнины, тогда как территории, неблагоприятные для культивации этой культуры, занимают задровую равнину и обширные межхолмные депрессии на юге хозяйства. Карта, полученная в ходе визуализации результатов нейросетевого прогнозирования, незначительно отличается от вышеописанной. Благоприятные для ржи места на ней занимают большие площади, особенно на юго-востоке и в центре хозяйства, а неблагоприятные территории полностью сосредоточены в пределах задровой равнины и долины р. Волга.

Различия между картами можно объяснить особенностями алгоритмов регрессионного и нейросетевого анализов. Регрессионный анализ – линейная процедура, в ходе расчета которого игнорируются не только слабозначимые факторы, но и предикторы, связанные с урожайностью нелинейно. Нейросетевой подход учитывает все факторы, входящие в модель, а также нелинейные связи между ними и откликом, вследствие многослойности перцептронов. Совокупность линейных и нелинейных методов прогнозирования позволяет получать больше информации для землепользователя. Более общий анализ подходов множественной регрессии (линейной и аддитивной /GAM/), случайного леса /Random Forest/ и нейросетей проведен в работе [23], в которой показано, что нейросети и GAM имеют тенденцию преувеличивать влияние нелинейностей (давая завышенные R^2), в отличие от линейной множественной регрессии и Random Forest. Возможности применимости конкретных методов прогнозирования урожайности могут быть оценены только на практике путем верификации моделей с использованием натурных наблюдений – путем сравнения прогнозных данных с реальной урожайностью на ключевых участках, а также использования данных дистанционного зондирования Земли.

При сопоставлении прогнозных карт была получена комбинированная карта, на которой выделено четыре типа местоположений по условиям культивации ржи. Площади с оптимальными условиями характеризуются прогнозом наилучших условий для произрастания на основе обоих методов. Для территорий с благоприятными условиями прогноз наилучших условий отмечается только по одному методу, а другой метод предсказывает посредственные условия. В местах с посредственными (благоприятными) и неблагоприятными прогнозами располагаются поля с посредственными условиями выращивания ржи – здесь требуется вложение больших дополнительных средств для получения высоких и стабильных урожаев. Те пространства, где прогнозы по обоим методам неблагоприятны, можно отнести к местоположениям с неблагоприятными условиями – выращивание ржи в их пределах нецелесообразно. Косвенным подтверждением справедливости прогнозов служит распределение угодий до ликвидации хозяйства – места, неблагоприятные для выращивания

ржи, в основном заняты гослесфондом и внутрихозяйственными лесами.

Выводы. База многолетних данных по урожайности ржи на трансекте может быть разделена на четыре группы. Первая характеризуется повышенными термическими ресурсами. Вероятность проявления такой климатической обстановки – 0,29. Второй кластер, который оптимален для произрастания ржи, имеет такую же вероятность проявления (<30 % лет наблюдений). Третий кластер можно назвать «прохладным» – вероятность его проявления – 0,21, а четвертый, с вероятностью проявления 0,14, может быть охарактеризован как «холодный».

В условиях «жаркого» кластера средняя продуктивность озимой ржи в пределах трансекты равна 2,6 т/га и зависит в основном от высоты местоположения. При оптимальных климатических условиях средняя продуктивность достигает 3,4 т/га и зависит от колебания гипсометрических отметок местности и изменчивости крутизны склонов. В условиях прохладных лет средняя урожайность составляет 2,8 т/га, а основным фактором изменчивости продуктивности служит гранулометрический состав почв. В наиболее холодные годы средняя урожайность составляет только 1,9 т/га. Ее колебания зависят в основном от характера прогрева территории.

Карты прогнозной урожайности озимой ржи для хозяйства, созданные на основе различных математических подходов, принципиально не различаются. Бывшее ОПХ «Заветы Ленина» пригодно для выращивания этой культуры: ее прогнозная средневзвешенная урожайность в пределах хозяйства колеблется от 1,52 до 2,61 т/га, а ее временная вариабельность – от 55,5 до 24,0 %.

Оптимальным местоположением для размещения посевов ржи служит ландшафт моренно-ледниковой равнины, тогда как неблагоприятные для ее выращивания ареалы располагаются на задровой равнине и в долине р. Волги.

Для целей адаптивно-ландшафтного земледелия необходимо рекомендовать совместное применение регрессионного и нейросетевого методов анализа, что обеспечивает получение наиболее достоверных и информативных прогнозов.

Создание карт прогнозной урожайности озимой ржи в пределах заброшенного участка имеет не только методологический, но и прикладной смысл, так как позволяет оценить его пригодность к выращиванию культуры и целесообразность выполнения дорогостоящих экспедиционных исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального исследовательского центра «Почвенный институт имени В. В. Докучаева». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв / Д. И. Люри, С. В. Горячкин, Н. А. Караваева и др. М.: ГЕОС, 2010. 415 с. ISBN 978-5-89118-500-5.

2. Сысоев В. В., Матасов В. М., Бричева С. С. Геофизический подход к установлению ландшафтных границ // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2024. № 1. С. 34–48. doi: 10.17308/geo/1609-0683/2024/1/34-48.
3. Детерминанты пространственного распределения заброшенных сельскохозяйственных земель в европейской части России / А. В. Прищепов, Д. Мюллер, М. Ю. Дубинин и др. // Пространственная экономика. 2013. № 3. С. 30–62.
4. Щерба В. Н., Долматова О. Н. Оценка состояния и перспективы развития системы землепользования южной лесостепи Омской области // Московский экономический журнал. 2022. № 5. С. 107–122. doi: 10.55186/2413046X.2022.7.5.323.
5. Methodological evolution of potato yield prediction: a comprehensive review / Y. Lin, S. Li, S. Duan, et al. // Frontiers in Plant Science. 2023. No. 14. P. 1214006. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1214006/full> (дата обращения: 21.01.2025). doi: 10.3389/fpls.2023.1214006.
6. Бисчоков Р. М., Ахматов М. М. Анализ и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур методами нечеткой логики // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2021. № 168. С. 274–287. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45849137> (дата обращения: 21.01.2025). doi: 10.21515/1990-4665-168-020.
7. Бисчоков Р. М. Анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур средствами искусственных нейронных сетей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2022. Т. 17. № 2. С. 146–157. doi: 10.22363/2312-797X.2022-17-2-146-157.
8. Лебедева В. М., Найдина Т. А. Учет осенне-зимнего увлажнения почвы в динамико-статистической модели прогноза урожайности озимых культур // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 79–95. doi: 10.37162/2618-9631-2022-4-79-95.
9. Андрющенко С. А. Тенденции и условия повышения экологической устойчивости АПК Российской Федерации // Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. № 2(392). С. 143–146. doi: 10.55186/25876740.2023.66.2.143.
10. Шалов Т. Б., Азубеков Л. Х. Адаптивно-ландшафтные системы земледелия в схеме землеустройства территории сельского поселения // Земледелие. 2013. № 6. С. 28–29.
11. Principles and applications of topography in precision agriculture / A. H. Rabia, J. Neupane, Z. Lin, et al. // *Advances in Agronomy*. 2022. Vol. 171. P. 143–189. doi: 10.1016/bs.agron.2021.08.005.
12. 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). С. 76–84. doi: 10.30766/2072-9081.2021.22.1.76-84.
13. Средостабилизирующая роль многолетних трав в условиях современных вызовов экологического и климатического характера / А. И. Белолуццев, А. Н. Куприянов, И. А. Кузнецов и др. // АгроЭкоИнфо. 2023. № 1(55). URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/1/st_127.pdf (дата обращения: 21.01.2025).
14. The application of the soil-agroclimatic index for assessing the agronomic potential of arable lands in the forest-steppe zone of Russia / D. S. Bulgakov, D. I. Rukhovich, E. A. Shishkonakova, et al. // *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51 (4). P. 448–459. doi:10.1134/S1064229318040038.
15. Шапко Д. И., Розов Н. Н. Внутриобластное природно-сельскохозяйственное районирования как форма учета биоклиматического потенциала // Земледелие. 1989. № 3. С. 18–22.
16. Беручашивили Н. Л. Геофизика ландшафта. М.: Высшая школа, 1990. 287 с.
17. Иванов Д. А. Влияние почв и рельефа на продуктивность разновозрастных травостоев // Международный сельскохозяйственный журнал. 2021. № 4(382). С. 73–76. doi: 10.24412/2587-6740-2021-4-73-76.
18. Рублюк М. В., Иванов Д. А., Карасева О. В. Влияние осушаемых агроландшафтов на свойства почвы и элементы структуры урожая озимой ржи // Плодородие. 2023. № 1 (130). С. 72–76. doi: 10.25680/S19948603.2023.130.17.
19. Сысоев В. А., Кедрова Л. И., Уткина Е. И. Значение озимой ржи для сохранения природного агроэкологического баланса и здоровья человека (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 14–20. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-014-020.
20. Минаев П. А. Анализ неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения России // Наука без границ. 2021. № 9(61). С. 26–32.
21. Плохинский Н. А. Биометрия. М.: МГУ, 1970. 367 с.
22. Learn R Programming. Neuralnet: Training of neural networks. URL: <https://www.rdocumentation.org/packages/neuralnet/versions/1.44.2/topics/neuralnet> (дата обращения: 14.02.2025).
23. Hjort J., Marmion M. Effects of sample size on the accuracy of geomorphological models // *Geomorphology*. 2008. Vol. 102. P. 341–350.

Поступила в редакцию 03.03.2025
После доработки 17.03.2025
Принята к публикации 09.04.2025