

УДК 911.2:631.4

С. В. Будник

Эмпирико-статистические взаимосвязи в агроландшафте и районирование территории по факторам, лимитирующим урожайность сельскохозяйственных культур

Житомирский национальный агроэкологический университет, г.Житомир,
Украина

Аннотация. В работе рассматриваются взаимосвязи урожайности сельскохозяйственных культур с климатическими, почвенными, гидрографическими и др. влияющими факторами. Получены эмпирические модели урожайности. Определены оптимумы произрастания сельскохозяйственных культур. Проведено районирование территории.

Ключевые слова: агроландшафт, урожайность, водосбор, районирование

Основной функцией агроландшафта как природно-антропогенного комплекса является производство сельскохозяйственной продукции. Поэтому критерием оптимальности структуры агроландшафта должна быть его продуктивность (урожайность). В настоящее время накоплено значительное количество разрозненных данных по условиям произрастания и продуктивности различных культур в различных природных зонах, т.е. существует объективная возможность объединить разрозненные данные из различных отраслей знаний для создания устойчивых и высоко продуктивных агроландшафтов на основе системы представления информации в ГИС-технологиях.

Основные блоки такой системы должны содержать следующую информацию: 1) пространственно-временные закономерности миграции веществ и энергии в агроландшафте (сток воды, смыв почвы и т.п.); 2) оптимальные погодно-климатические условия для произрастания сельскохозяйственных культур; 3) оптимальные водно-физические и агрохимические свойства почв для различных сельскохозяйственных культур; 4) оптимальное водопотребление культур; 5) оптимальная последовательность расположения культур на склоне, устойчивая к водной эрозии; 6) оптимальная структура севооборотов, дифференцированная по погодно-климатическим и почвенным условиям; 7) оптимальное сочетание элементов в агроценозе и агроландшафте (в агроценозе: пропашные – сплошного сева – пар и т.п.; а в агроландшафте: лес – луг – пашня и т.п.); 8) оптимальное сочетание биоценозов и агроценозов в отношении регулирования дендрофауны полезных насекомых; 9) оптимальные дозы удобрений под конкретные культуры по типам почв и климатическим условиям; 10) урожайность сельскохозяйственных культур на различных почвах в богарных условиях и при орошении.

Перечисленная информация должна выступать в качестве объективных условий-ограничений при определении оптимальной структуры агроландшафта на различных уровнях обобщения: для всей территории Украины, области, района или отдельного хозяйства. Дифференциация территории на различные ландшафтные таксоны подчиняется смене условий миграции веществ и энергии. Для возможности установления устойчивых взаимосвязей пространственно-временной миграции веществ и энергии в агроландшафте, удобно рассматривать агроландшафтную систему совместно с водосборным бассейном. Совместимость продуктивности сельскохозяйственных культур с параметрами функционирования речного бассейна может быть достигнута на уровне разновидностей почв. Аппаратом оптимизации изучаемой системы могут служить методы математического программирования (в частности симплекс-метод). Дифференциация информации по территории позволит получить районирование территории по особенностям оптимальной структуры агроландшафтов. Предлагаемая работа может быть выполнена путем широкого применения картографических, гидрометеорологических, почвенных, агрономических и иных материалов.

В результате реализации предлагаемой системы пользователь может, как оценить продуктивные особенности интересующей его территории, так и установить оптимальную структуру хозяйственного использования агросистемы.

В задачу наших исследований входило определение эмпирико-статистических взаимосвязей в агроландшафтах, установление оптимумов влияния факторов на урожайность сельскохозяйственных культур, дифференциацию территории по условиям, лимитирующим произрастание сельскохозяйственных культур.

Для решения поставленных задач нами проведен анализ взаимосвязей в агроландшафтах Степи Украины. Для возможности более корректного сравнения результатов различных опытов, а также с целью выявления природного потенциала почв, нами проведена выборка урожайности различных культур на различных почвенных разностях без внесения удобрений и без орошения [1]. На некоторых почвенных разностях, выделенных на территории степи Украины, выращивание отдельных культур не проводилось, что связано, как с климатическими особенностями территории, с традиционным укладом земледелия, так и с локальностью размещения научно-исследовательских организаций. На основе выборочных и осредненных материалов наблюдений были построены многофакторные зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от водно-физических, агрохимических свойств почв, гидрографических и климатических характеристик водосборов. Характеристики почв выбирались для верхнего 0-30 см слоя почвы. Точность аппроксимации исходных данных достаточно высока 3-6%, при точности измерений урожайности в соответствии с [6]: для озимой пшеницы 3,5-2,5%, озимой ржи – 4,2%, кукурузы на зерно – 3,8-3%, кукурузы на силос – 4,3-2,9%, сахарной свеклы 3,8-1,0%, картофеля 3,9-3,2%, яровой пшеницы 4,1-2,7%. Абсолютные ошибки измерения урожайности по данным тех же авторов составляют: для яровой пшеницы 0,5 ц/га, озимой пшеницы 0,9 ц/га, озимой ржи 0,9 ц/га, кукурузы на зерно 1,3 ц/га, кукурузы на силос 12,4 ц/га, сахарной свеклы 12,3 ц/га, картофеля 7,7 ц/га.

Как уже было сказано выше влияние пространственно-временной миграции веществ и энергии в агроландшафте на его продуктивность удобно рассматривать в границах водосборных бассейнов. Здесь продуктивность агроландшафта можно рассчитать через процентное распределение почв на бассейнах. Поскольку агроландшафт состоит не только из агроценозов, но и из лесных полос, естественных кормовых угодий, лесов, водоемов и т.п. урожайность агроценозов обеспечивается взаимодействием всей совокупности ценозов в данном бассейне.

Корреляционные отношения урожайности сельскохозяйственных культур в агроландшафте с различными характеристиками свойств почвенных разностей, климатическими характеристиками территории, гидрографическими характеристиками бассейна и модулем максимального стока воды в бассейне представлены в табл.1. Наибольшую корреляционную зависимость шесть рассматриваемых сельскохозяйственных культур (озимая рожь, ячмень, картофель, гречиха, сахарная свекла, горох) показывают с такими факторами как содержание гумуса в 0-30 см слое почвы, водопроницаемость почв и относительная влажность воздуха. На урожайность гречихи исследуемые 25 факторов вообще влияют слабо, корреляционные отношения здесь значимы только с содержанием гумуса, относительной влажностью воздуха и площадью водосбора.

Для всех культур строились эмпирические зависимости урожайности от влияющих факторов методом Брандона (последовательного исключения факторов), путем перебора сочетаний наиболее влияющих факторов определялись модели наиболее соответствующие исходным данным.

Для определения урожайности озимой ржи (зерно) на водосборе наиболее подходит следующая зависимость (последовательность чередования факторов в модели определяет значимость их влияния на урожайность) (U_1 , ц/га):

$$U_1 = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10} X_{11},$$

$$X_1 = 1 / (0,05896 + 0,003574 C_b - 0,001196 C_b^2);$$

$$X_2 = 0,867611 P_n^{0,4574} \exp(-0,08771 P_n); X_3 = 1 / (1,036 - 40,63 \exp(-1,271 N_n));$$

$$X_4 = 1 / (1,701 - 0,05978 DAB + 0,001027 DAB^2); X_5 = fl / (-0,001146 + 1,003 fl);$$

$$X_6 = 1 / (7,014 - 1,897 pH + 0,1479 pH^2); X_7 = 1 / (1,235 - 0,01624 C_s + 0,0002672 C_s^2);$$

$$X_8 = D / (-0,2491 + 1,045 D); X_9 = 1 / (0,9316 + 0,0009124 H - 0,000002828 H^2);$$

Таблица 1. Корреляционные отношения урожайности сельскохозяйственных культур в агроландшафте с влияющими факторами.
Значимое корреляционное отношение при уровне значимости $\alpha=5\%$ равно 0,2108

Фактор	Озимая рожь	Ячмень	Картофель	Гречиха	Сахарная свекла	Горох
Модуль максимального стока воды, л/(с·км ²)	0,07	0,22	0,36	0,16	0,19	0,17
Содержание гумуса в 0-30 см слое почвы, %	0,47	0,67	0,32	0,29	0,64	0,33
Общая пористость, %	0,08	0,25	0,33	0,12	0,42	0,36
Аэрация при наименьшей влагоемкости, %	0,09	0,25	0,33	0,15	0,37	0,19
Наименьшая влагоемкость, %	0,19	0,17	0,41	0,03	0,20	0,43
Влажность завядания, %	0,18	0,12	0,20	0,08	0,27	0,39
Диапазон активной влаги, %	0,16	0,15	0,40	0,10	0,05	0,27
Водопроницаемость почвы, мм/мин	0,70	0,57	0,44	0,18	0,61	0,56
Дисперсность по Качинскому	0,33	0,35	0,44	0,04	0,27	0,46
pHводн	0,47	0,60	0,20	0,12	0,26	0,26
Средняя высота водосбора, м	0,28	0,47	0,21	0,20	0,09	0,26
Площадь водосбора, км ²	0,12	0,19	0,23	0,32	0,18	0,06
Густота гидрографической сети, км/км ²	0,19	0,25	0,18	0,03	0,10	0,22
Лесистость водосбора, %	0,19	0,16	0,26	0,13	0,31	0,17
Распаханность водосбора, %	0,03	0,05	0,16	0,03	0,05	0,21
Среднеголетняя сумма осадков за год, мм	0,19	0,22	0,07	0,14	0,09	0,05
Максимальная интенсивность осадков, мм/мин	0,07	0,03	0,09	0,19	0,13	0,13
Среднегодовая температура воздуха, °С	0,15	0,18	0,20	0,08	0,12	0,10
Относительная влажность воздуха, %	0,38	0,61	0,26	0,29	0,30	0,45
Валовое содержание азота в почве, %	0,30	0,43	0,39	0,21	0,55	0,34
Валовое содержание фосфора в почве, %	0,41	0,31	0,28	0,10	0,14	0,27
Валовое содержание калия в почве, %	0,24	0,13	0,43	0,05	0,25	0,14
Легкогидролизуемый азот, мг/100 г почвы	0,19	0,31	0,53	0,20	0,16	0,50
Подвижный фосфор, мг/100 г почвы	0,55	0,13	0,16	0,04	0,47	0,20
Обменный калий, мг/100 г почвы	0,52	0,60	0,08	0,21	0,44	0,39

$$X_{10} = 1/(1,01-0,000004474F);$$

$$X_{11} = 1/(3,469-0,6642t_{cp}+0,0445t_{cp}^2),$$

где C_b – водопроницаемость почвы, мм/мин; P_n – содержание подвижного фосфора в 0-30 см слое почвы, мг/100 г почвы; N_n – содержание легкогидролизуемого азота, мг/100 г почвы; DAB – диапазон активной влаги,%; f_l – залесенность водосбора,%; pH – кислотность почвы (водная вытяжка); C_s – сумма поглощенных оснований, мг-экв/100г почвы; D – дисперсность по Качинскому; H – средняя высота водосбора, м; F – площадь водосбора, км²; t_{cp} – среднегодовая температура воздуха, °С.

Относительная ошибка модели $E = 4,57\%$; абсолютная ошибка модели $E_1 = 0,12$ ц/га; коэффициент множественной корреляции $r = 0,92$; критерий качества модели (критерий Гаусса) $s/\sigma = 0,39$.

Исследование поверхностей влияния (урожайность = $f(i)$ – i – й фактор; произведение X -уравнений всех остальных факторов модели (K_i)) позволило получить некоторые границы оптимальных характеристик, при которых урожайность озимой ржи в степи Украины в богарных условиях наивысшая. Так, максимум урожайности озимой ржи здесь наблюдается при содержании подвижных форм фосфора в пределах 6,75-7,39 мг/100 г почвы, легкогидролизуемого азота (при благоприятных условиях роста) 7,48-8,3 мг/100г почвы, при не благоприятных условиях большое содержание легкогидролизуемого азота в почве способствует снижению урожайности (рис.1). При благоприятных условиях оптимальный DAB в почве составляет 16,1%, при не благоприятных – 30,9%. Диапазон залесенности водосборов при котором наблюдается максимум урожайности составляет 0-3,38%, увеличение залесенности до 5,63% способствует снижению урожайности, лесистость более 5,63% на урожайность влияния не показывает. Оптимум $pH_{водн}$ почвы также не однозначен и зависит от суммарного влияния факторов, так при благоприятных условиях роста максимум урожайности наблюдается при $pH_{водн} = 6,89-6,97$, при не благоприятных – при $pH_{водн} = 5,9$. Оптимум суммы поглощенных оснований составляет 36,49-39,11 мг-экв/100г почвы.

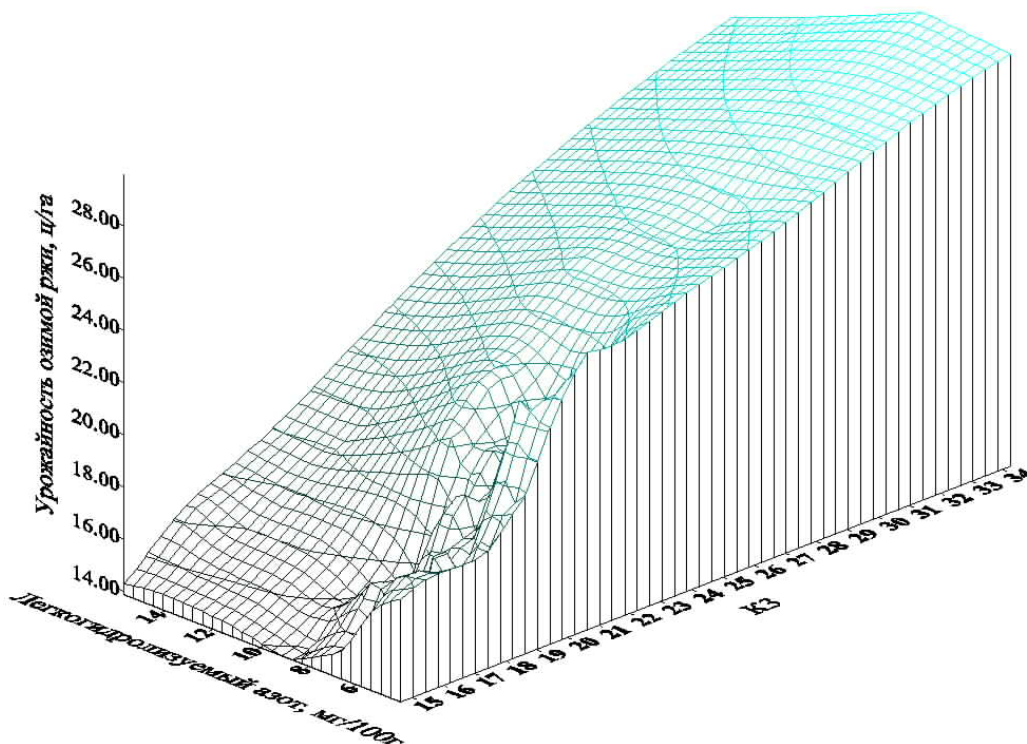


Рис.1. Поверхность влияния содержания легкогидролизуемого азота (мг/100г почвы) в 0-30 см слое почвы на урожайность озимой ржи (ц/га) при обобщенном воздействии метеорологических, гидрографических и почвенных факторов (K_3)

В результате проведенных исследований получено районирование территории Степи Украины по факторам, лимитирующим урожайность озимой ржи (рис.2). Из элементов

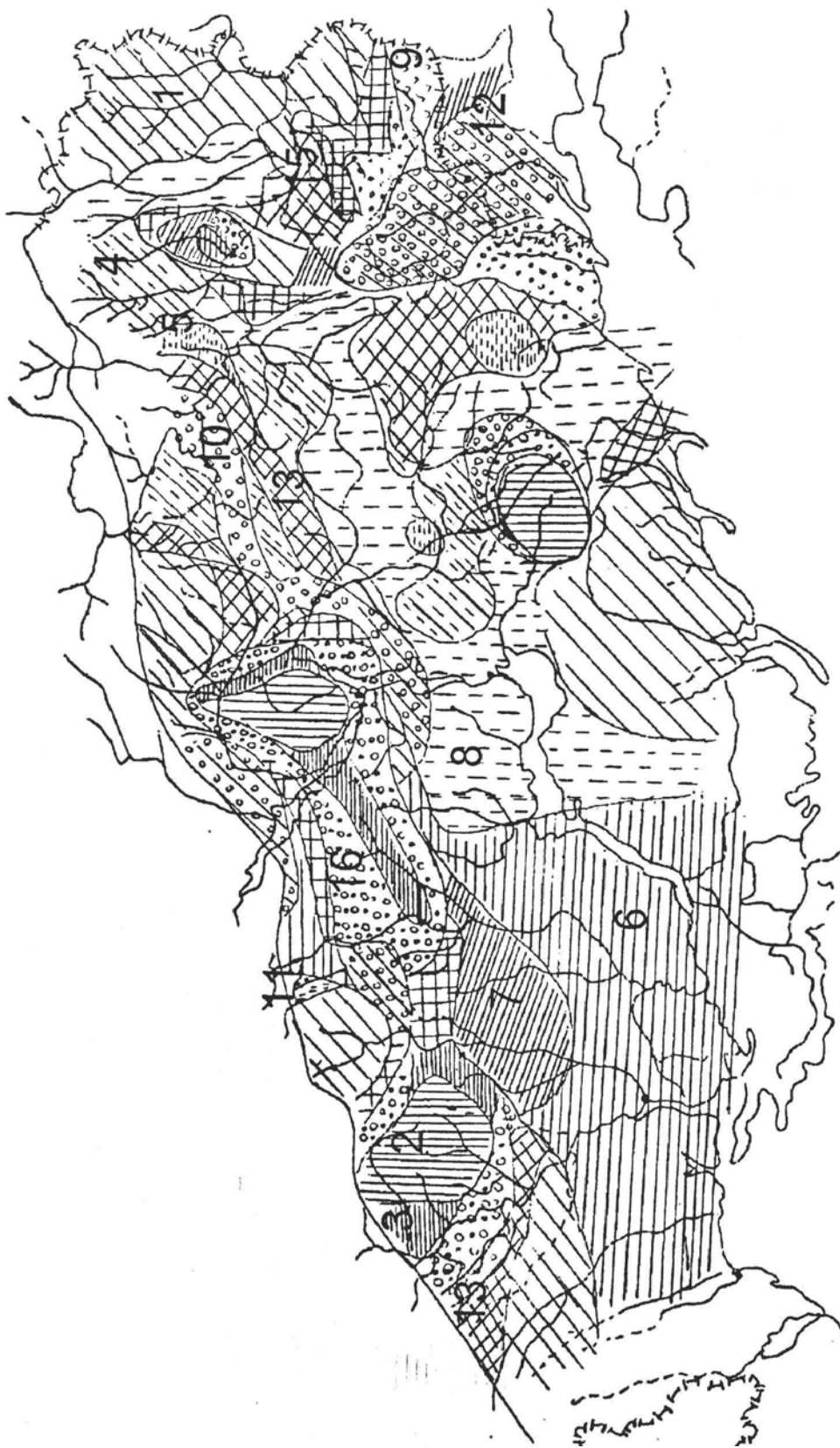


Рис.2. Районирование территории Степи Украины по факторам, лимитирующим произрастание озимой ржи

Условные обозначения к рис.2: 1 – содержание подвижного фосфора; рНводн, дисперсность по Качинскому, водопроницаемость почвы, диапазон активной влаги, среднегодовая температура воздуха, лесистость; 2 - площадь водосбора, рНводн, содержание подвижного фосфора, водопроницаемость, содержание подвижного фосфора, сумма поглощенных оснований, дисперсность, высота водосбора и лесистость; 4 – дисперсность, диапазон активной влаги, рНводн; 5 – дисперсность, диапазон активной влаги; 6 – водопроницаемость, содержание подвижного фосфора; 7 - дисперсность, содержание подвижного фосфора, высота водосбора; 8 - среднегодовая температура воздуха, дисперсность, водопроницаемость и диапазон активной влаги; 9 – содержание подвижного фосфора, рНводн, дисперсность; 10 – дисперсность, содержание подвижного фосфора, рНводн, высота водосбора; 11- водопроницаемость, высота водосбора и лесистость, среднегодовая температура воздуха; 12 – водопроницаемость, дисперсность, содержание подвижного фосфора, высота водосбора, лесистость, среднегодовая температура воздуха; 13 – содержание подвижного фосфора, сумма поглощенных оснований, рНводн, дисперсность, диапазон активной влаги, среднегодовая температура воздуха; 14 – содержание подвижного фосфора, дисперсность, рНводн, водопроницаемость, лесистость; 15 – содержание подвижного фосфора, сумма поглощенных оснований, водопроницаемость, дисперсность, диапазон активной влаги, лесистость, среднегодовая температура воздуха; 16 – содержание подвижного фосфора и сумма поглощенных оснований, водопроницаемость, дисперсность, рНводн, лесистость, высота водосбора, среднегодовая температура воздуха.

питания, содержащихся в почве, на урожайность озимой ржи оказывает лимитирующее влияние содержание подвижного фосфора, реже сумма поглощенных оснований, сильное влияние оказывают агрофизические свойства почв и рН.

Урожайность ячменя (зерно) на водосборе можно определить по зависимости (U_2 , ц/га):

$$U_2 = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10} X_{11},$$

$$X_1 = 32,26 - 0,3601gm - 211,7/gm^2; X_2 = 1,254 - 0,1795Cb + 0,02821Cb^2;$$

$$X_3 = 0,772 + 0,001309H + 35,85/H^2; X_4 = 0,000125pH^{11,07} \exp(-1,79pH);$$

$$X_5 = 0,000033977BZ^{7,018} \exp(-0,5921BZ); X_6 = 1/(72,48 - 1,917e_0 + 0,01285e_0^2);$$

$$X_7 = 1/(0,891 + 0,03009Nn - 0,001853Nn^2); X_8 = 1/(0,8295 + 1,986Pb - 5,391Pb^2);$$

$$X_9 = 1/(0,9991 - 0,005008fl + 0,001578fl^2); X_{10} = 1/(1,507 - 0,6161Kb + 0,1802Kb^2);$$

$$X_{11} = 7,14 \cdot 10^{-7} on^{4,695} \exp(-0,08468on),$$

где gm – содержание гумуса в слое 0-30 см почвы; BZ – влажность завядания,%; Pb – валовое содержание фосфора в слое 0-30 см почвы, %; Kb – валовое содержание калия в слое 0-30 см почвы,%; on- общая пористость, %.

$$E = 4,92\%; E_1 = 0,144 \text{ ц/га}; r = 0,90; s/\sigma = 0,43.$$

Исследование поверхностей влияния отдельных факторов на урожайность зерна ячменя при учете суммарного воздействия остальных факторов показало, что увеличение урожайности ячменя наблюдается до высоты водосбора 195 м, при дальнейшем увеличении высоты водосбора урожайность падает. При неблагоприятных условиях роста урожайность ячменя с увеличением рН уменьшается, при благоприятных условиях максимум урожайности отмечается при рН = 6,9. Максимум урожайности отмечается при BZ=13,86%, $e_0=73,97\%$. В диапазоне лесистости 0-3,38% урожайность ячменя максимальна, при лесистости более 3,38 урожайность от лесистости не зависит. При прочих благоприятных условиях максимум урожайности наблюдается при содержании легкогидролизруемого азота в почве 8,03 мг/100 г почвы, при неблагоприятных условиях роста при Nn = 8,08 мг/100г почвы наблюдается минимум урожайности, т.е. границы оптимумов сильно зависят от прочих условий выращивания культур, что также отмечалось и другими авторами (Оптимальные параметры плодородия, 1984). При благоприятных условиях максимум урожайности наблюдается при валовом содержании фосфора 0,104%, при неблагоприятных условиях максимум урожая наблюдается при максимуме содержания Pb, а минимум при Pb=0,15. Максимальная урожайность при благоприятных условиях наблюдается при валовом содержании калия в почве равном 1,98%, при неблагоприятных – максимум урожая наблюдается при Kb=1,03, а минимум в диапазоне 1,84-1,98%. Влияние общей пористости на урожайность ячменя также не однозначно, при благоприятных условиях максимум урожайности наблюдается при on = 57,08%, при неблагоприятных условиях минимум урожая наблюдается при on=54,11%.

Литература

1. Вахрушев Б.А. Палеокарстовые коллекторы нефтегазоносных структур Крымско-Черноморского региона//Геодинамика и нефтегазоносные системы Черноморско-Каспийского региона. Сб. докл. III Международной конференции. – Симферополь, 2001. – С. 32-35.
2. Геологическая карта Горного Крыма. Масштаб 1:200000. Объяснительная записка/Под ред. Н.Е. Деренюка. – К.: Мингео УССР. Крымгеология, 1984. – 134 с.
3. Геологические памятники Украины: Справочник-путеводитель/Коротенко Н.Е., Щирица А.С., Каневский А.Я. и др. – К.: Наукова думка, 1985. – 156 с.
4. Геология СССР. – Т. VIII. Часть I. Крым. Геологическое описание. – М.: Недра, 1969. – 575 с.
5. Геология шельфа УССР. Стратиграфия. – К.: Наукова думка, 1984. – 169 с.
6. Геодинамика Крымско-Черноморского региона. Сб. матер. конференции. – Симферополь, 1997. – 150 с.
7. Герасимов М.Е. Тектоническая схема Причерноморья на принципах актуалистической геодинамики//Проблемы сейсмобезопасности Крыма. – Симферополь, 1995. – С. 41-44.
8. Дублянский В.Н., Ломаев А.А. Карстовые пещеры Украины. – К.: Наукова думка, 1980. – 180 с.
9. Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н. Карстовая республика. – Симферополь: СОНАТ, 1996. – 88 с.
10. Дублянский В.Н., Вахрушев Б.А., Амеличев Г.Н., Шутов Ю.И. Красная пещера/Опыт комплексных карстологических исследований. – М.: Изд. Рос. ун-та дружбы народов, 2002. – 189 с.
11. Ена В.Г., Ена А.В., Ена Ан.В. Заповедные ландшафты Тавриды. – Симферополь: Бизнесинформ, 2004. – 424 с.
12. Казанцев Ю.В. Тектоника Крыма. – М.: Наука, 1982. – 112 с.
13. Крым: геология полуострова//Крымский форум профессионалов. – Симферополь, 2005. – 30 с.
14. Кузнецов А.Г., Джуль В.С. Классификация геологических памятников природы Крыма и их охрана//Природные комплексы Крыма, их оптимизация и охрана. – Симферополь, СГУ, 1984. – С. 8-12.
15. Лебедев Т.С., Оровецкий Ю.П. Особенности тектоники Горного Крыма//Геофиз. сб. ин-та геофизики АН УССР, №18, 1966.
16. Лысенко Н.И., Кузнецов А.Г. Динамика рифогенных циклов карбонатных формаций Крыма в свете новых структурных данных//Новые подходы к структурно-динамическим исследованиям геосистем. – Казань, 1989. – С. 106-107.
17. Лысенко Н.И. Некоторые общие замечания о тектонике Горного Крыма в свете историко-геологических данных//Геодинамика Крымско-Черноморского региона. – Симферополь, 1997. – С. 68-72.
18. Лысенко Н.И., Кузнецов А.Г. О великом геологическом споре между фиксистами и неомобилистами и его отражение в крымской геологии//Проблемы геодинамики и нефтегазоносности Черноморско-Каспийского региона. Сб. докл. конференции. – Симферополь, 2004. – С. 182-187.
19. Милеев В.С., Розанов С.Б., Барабошкин Е.Ю., Шалимов И.В. Геологическое строение и эволюция Горного Крыма//Вестн. МГУ. Серия 4. Геология, №3, 1997. – С. 17-21.
20. Моисеев А.С. Основные черты строения Горного Крыма//Тр. Лен. общ-ва естествоиспыт. – Т. 64, вып. 1, 1935. – С. 15-29.
21. Муратов М.В. Краткий очерк геологического строения Крымского полуострова. – М.: Госгеолтехиздат, 1960. – 207 с.
22. Печерский Д.М., Сафонов В.А. Палинспастическая реконструкция положения Горного Крыма в средней юре - раннем мелу на основе палеомагнитных данных//Геотектоника, №1, 1993. – С. 95-105.
23. Попадюк И.В., Смирнов С.Е. Крымский ороген: покровная интерпретация//Геодинамика Крымско-Черноморского региона. – Симферополь, 1997. – С. 27-30.
24. Соллогуб Б.В., Соллогуб Н.В. Строение земной коры Крымского полуострова//Сов. геология, №3, 1977.
25. Туркевич Е.В., Полухтович Б.П. Верхньокрейдові карбонатні колектори Рівнинного Криму та прилеглої шельфу Чорного моря//Проблемы геодинамики и нефтегазоносности Черноморско-Каспийского региона. – Симферополь, 2004. – с. 248-252.
26. Юдин В.В. Новая модель геологического строения Крыма//Природа, №6, 1994. – С. 28-31.
27. Юдин В.В. Геологическое строение Крыма на основе актуалистической геодинамики//Приложение к сб. «Вопросы развития Крыма». – Симферополь, 2001. – 46 с.

Анотація. У роботі розглядаються взаємозв'язки врожайності сільськогосподарських культур із кліматичними, ґрунтовими, гідрографічними й ін. факторами, що впливають. Отримано емпіричні моделі врожайності. Визначено оптимуми росту сільськогосподарських культур. Проведено районування території.

Ключові слова: агроландшафт, урожайність, водозбір, районування

Annotation. In work interrelations of productivity of agricultural crops with climatic, soil, hydrographic, etc. influencing factors are considered. Empirical models of productivity are received. Optimum of growth of agricultural crops are certain. Regionalization of territory is lead.

Keywords: agrolandscape, productivity, a catchment, regionalization

Поступила в редакцію 25.01.2008 г.