

Юрий Николаевич Трубников

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», ведущий научный сотрудник лаборатории космических систем и технологий; Красноярский государственный аграрный университет, профессор кафедры почвоведения и агрохимии, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Красноярск, Россия

E-mail: trubnikov124@yandex.ru

Александр Артурович Шпедт

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», директор; Сибирский федеральный университет, профессор кафедры географии, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, Красноярск, Россия

E-mail: shpedtaleksandr@rambler.ru

МОДЕЛИ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ В ПОЧВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

Цель работы: создание моделей урожайности зерновых культур в зависимости от содержания в почве органических веществ. *Задачи исследований:* разработка информационно-логических моделей урожайности яровой пшеницы на серых лесных и дерново-подзолистых почвах, а также построение модели урожайности зерновых культур на черноземах Красноярской лесостепи в зависимости от содержания в почве органических веществ. Исследования проводились на серых лесных и дерново-подзолистых почвах подтаежной зоны, прилегающей к северной части Ачинско-Боготольской лесостепи, а также на черноземах обыкновенных и черноземах выщелоченных Красноярской лесостепи. Использовались методы полевого и микрополевого опыта, аналитический, математического моделирования и информационно-логического анализа, метод моделирования связи основных компонентов органического вещества почв и урожайности. Для оценки уровня плодородия серых лесных почв наиболее приемлема модель: $Y = G \times (M \times (pH \times P))$ с прогнозирующим эффектом 72 %. Для объединенной оценки уровня плодородия серых лесных и дерново-подзолистых почв наиболее эффективны модели вида: $Y = G \times (M \times (pH \times \Phi G))$ и $Y = G \times (pH \times (M \times P))$. Прогнозирующий эффект по моделям составляет 77–78 %, что может использоваться для повышения плодородия почв, а также применимо при их бонитировке. Во всех моделях со значительной долей распознаваемости ведущее место занимает гумус. Высокий ранг имеет мощность гумусового горизонта. Математические модели урожайности зерновых культур в зависимости от содержания в почве органических веществ позволили рассчитать минимальные, средние и максимальные значения углерода гумуса, подвижных гумусовых веществ и соответствующие им уровни урожайности зерновых культур. Оказалось, что минимальное содержание гумуса соответствует 2,10–3,03 %, среднее – 3,02–4,02, высокое – 4,02–5,10 %. Нижнее значение оптимального содержания общего углерода можно принять как 2,33 % или 4,00 % гумуса, что соответствует верхнему значению среднего содержания и нижнему значению высокого содержания гумуса.

Ключевые слова: модель урожайности, почва, гумус, органические вещества, плодородие.

Yuri N. Trubnikov

Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS", Leading Researcher, Laboratory of Space Systems and Technologies; Krasnoyarsk State Agrarian University, Professor at the Department of Soil Science and Agrochemistry, Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Krasnoyarsk, Russia
E-mail: trubnikov124@yandex.ru

Alexander A. Shpedt

Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS", Director; Siberian Federal University, Professor at the Department of Geography, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: shpedtaleksandr@rambler.ru

GRAIN CROPS YIELD MODELS DEPENDING ON THE ORGANIC SUBSTANCE CONTENT IN THE SOIL

The purpose of the study: to create models of grain yield depending on the content of organic substance in the soil. Research objectives: to develop information-logical models of the yield of spring wheat on gray forest and sod-podzolic soils, as well as to construct a model of the yield of grain crops on the chernozem of the Krasnoyarsk forest-steppe, depending on the content of organic substance in the soil. The studies were carried out on gray forest and sod-podzolic soils of the subtaiga zone adjacent to the northern part of the Achinsk-Bogotol forest-steppe, as well as on ordinary chernozems and leached chernozems of the Krasnoyarsk forest-steppe. The methods of field and microfield experience, analytical, mathematical modeling and information-logical analysis, the method of modeling the relationship between the main components of soil organic matter and yield were used. To assess the level of fertility of gray forest soils, the most acceptable model is $Y = G \times (M \times (pH \times P))$ with a predictive effect of 72 %. $M \times (pH \times FG)$ and $Y = G \times (pH \times (M \times P))$. The predictive effect according to the models is 77–78 %, which can be used to increase soil fertility, and is also applicable for their appraisal. In all models with a significant degree of recognition, the leading place is occupied by humus. The thickness of the humus horizon has a high rank. Mathematical models of the yield of grain crops, depending on the content of organic substances in the soil, made it possible to calculate the minimum, average and maximum values of the carbon of humus, mobile humic substances and the corresponding levels of yield of grain crops. It turned out that the minimum humus content corresponds to 2.10–3.03 %, average – 3.02–4.02, high – 4.02–5.10 %. The lower value of the optimal content of total carbon can be taken as 2.33 % or 4.00 % of humus, which corresponds to the upper value of the average content and the lower value of the high humus content.

Key words: yield model, soil, humus, organic matter, fertility.

Введение. По сути, все биосферные явления так или иначе связаны с органическим веществом почвы, которое определяет не только экологические, но и экономические пороги интенсификации земледелия. От обеспеченности почв органическим веществом зависит система применения органических и минеральных удобрений, которые относятся к основополагающим факторам интенсификации агропроизводства. Этот ключевой биосферный элемент, обуславливающий экологическую стабильность и защиту всей агроэкосистемы от различных техногенных и в первую очередь пестицидных нагрузок, способствует устойчивости земледелия при неблагоприятных погодных условиях. В конечном итоге, оказывая влияние на продуктивность сельскохозяйственных культур, органическое вещество почв определяет благосостояние человека. Проблеме органического вещества почв Приенисейской Сибири в целом, а также специальным направлениям исследований посвящено немало работ [1, 2], вместе с тем надо признать, что эта научная отрасль представляет собой открытую систему для получения новых знаний, актуальность которых не угасает, а, напротив, только обостряется в связи с внедрением новых средств и технологий в земледелии. Интенсификация агропроизводства предусматривает в первую очередь применение эффек-

тивных управленческих решений, научной основой которых служат различные производственные и функциональные модели. К группе основополагающих можно с уверенностью отнести модели урожайности сельскохозяйственных культур, которые зависят в том числе и от обеспеченности почв органическим веществом.

Цель исследований. Создание моделей урожайности зерновых культур в зависимости от содержания в почве органических веществ.

Условия, материалы и методы. Исследования проводились в подтаежной зоне, которая входит в южнотаежно-лесной, плоскоравнинный, дерново-подзолистый и болотно-подзолистый район Западно-Сибирской провинции, на серых лесных и дерново-подзолистых почвах (Зареченский стационар), а также в условиях южной части Красноярской лесостепи на выщелоченных и обыкновенных черноземах (Мининский стационар). Агрохимическая характеристика почв приведена в таблице 1.

По количеству осадков за вегетационный период годы исследований сгруппированы в следующие ряды: увлажненные – количество осадков 267–424 мм; нормальные – количество осадков 246–258 мм; засушливые – количество осадков 150–210 мм. В подтаежной зоне (Зареченский стационар) преобладает доля увлажненных и нормальных лет, в открытой лесосте-

пи (Мининский стационар) – больше лет с нормальными и засушливыми условиями. Среднегодовая температура воздуха составляет от -1,1 до 0,3 °С, сумма активных температур – 1550–

1661 °С. Период вегетации – 95–120 дней. Глубина промерзания почвы 0,6–1,2 м. Высота снежного покрова 0,5–0,8 м.

Таблица 1

Агрохимические свойства почв опытных стационаров (0–20 см)

Гумус, %	рНсол.	V, %	Hr	S	P ₂ O ₅	K ₂ O
			мг-экв/100 г почвы		мг/100 г почвы	
Чернозем выщелоченный (Мининский стационар)						
6,1–7,3	6,8–7,1	95	1,2	48,0	14,3	17,1
Чернозем обыкновенный (Мининский стационар)						
4,4–6,0	7,1–7,6	99	0,7	54,0	4,8	22,0
Серая лесная почва (Зареченский стационар)						
3,7–4,1	4,6–4,8	71	6,5	16,0	7,4	8,1
Дерново-подзолистая почва (Зареченский стационар)						
2,1–2,4	4,4–4,6	69	4,1	9,0	2,3	6,2

Агрохимические свойства почв определяли по общепринятым методикам [3]. Содержание гумуса определяли по методу И.В. Тюрина, а для извлечения подвижной части гумуса (С_{0,1н.НаОН}) использовали 0,1 н. гидроксид натрия, при соотношении почвы и растворителя 1:20. Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета прикладных программ Snedecor [4].

Исходный материал для моделирования урожайности пшеницы на дерново-подзолистых и серых лесных почвах был получен на производственных посевах, а также на опытном поле Зареченского стационара. Методом площадок

[5] проводили сопряженные учеты урожая и отбор почвенных проб для определения агрохимических свойств почв в пахотном и подпахотном горизонтах. На поле учитывался урожай пшеницы в 20–30-кратной повторности на площадках по 1 м².

Результаты и их обсуждение. Для определения факторов, необходимых при математическом моделировании урожайности пшеницы в зависимости от свойств серых лесных и дерново-подзолистых почв, по выделенным информационным выборкам рассчитаны корреляционные связи (табл. 2).

Таблица 2

Корреляция урожайности пшеницы с содержанием гумуса и другими агрохимическими свойствами почв

Признак	Коэффициент корреляции (n=165)								
	у*	Г	М	P ₂ O ₅	K ₂ O	рН	S	Hr	V
У	1,00	0,43*	0,53*	0,40*	0,21	0,35*	0,72*	0,29	0,30
Г	0,43*	1,00	0,54*	0,10	-0,01	-0,03	0,50*	0,49*	-0,08
М	0,53*	0,54*	1,00	0,33	0,20	0,01	0,50*	0,50*	0,06
P ₂ O ₅	0,40*	0,10	0,33	1,00	0,70*	-0,01	0,53*	0,42	0,19
K ₂ O	0,21	-0,01	0,20	0,70*	1,00	-0,11	0,36	0,36	0,10
рН	0,35*	-0,03	0,01	-0,01	-0,11	1,00	0,47*	-0,57*	0,85*
S	0,72*	0,50*	0,51*	0,53*	0,36	0,47*	1,00	0,23	0,66*
Hr	0,29	0,49*	0,50*	0,42*	0,36	-0,57*	0,23	1,00	-0,51*
V	0,30	-0,07	0,06	0,19	0,10	0,85*	0,66*	-0,51*	1,00

Примечание: У – урожайность зерна, т/га; Г – содержание гумуса, %; М – мощность гумусового горизонта, см; P₂O₅, K₂O – содержание подвижного фосфора и обменного калия, мг/100 г почвы; рН, Hr – обменная и гидролитическая кислотность почвы; S – сумма обменных оснований, мг-экв./100 г; V – степень насыщенности почв основаниями, %; * – значимая величина корреляции.

Расчет парных коэффициентов корреляции между свойствами почв, а также между свойствами почв и урожайностью показал наличие коррелирующих факторов по всем выборкам и однотипность этих связей. По степени убывания влияния на величину урожая свойства почв располагаются в такой последовательности: сумма поглощенных оснований, мощность гумусового горизонта, содержание гумуса, содержание фосфора, рН. Высокая корреляционная связь суммы обменных оснований с содержанием в почве органического вещества [6], объясняет первостепенную роль именно гумуса в формировании урожайности пшеницы на кислых почвах подтаежной зоны.

Математическая статистика указывает на значительную скоррелированность свойств почв и явных отличий от нормального распределения многих факторов (по показателям асимметрии и эксцесса). Это является ограничением в использовании корреляционно-регрессионного анализа, для построения моделей эффективного плодородия целесообразно использовать информационно-логический анализ, суть которого заключается в расчете количества информации, передаваемой каждым фактором (свойства почв) явлению (величине урожая), определении логических функций связи факторов и явления и построении на этой основе логических моделей урожайности [7, 8]. Полученные результаты показывают направление и форму связей свойств почв и урожая. Практически они везде криволинейны (кроме формы связи урожая с суммой поглощенных оснований). Это свидетельствует о том, что коэффициенты корреляции не точно отражают степень связи признаков (они характеризуют прямолинейную связь), а множественная регрессия здесь также малоэффективна из-за неопределенной (геометрически) формы связей. В этом отношении более совершенен информационно-логический анализ – с его помощью описывается любая форма связи.

Например, используя большую ($n = 150-180$) выборку данных, установлено, что для оценки уровня плодородия серых лесных почв наиболее приемлема модель: $Y = \Gamma \times (M \times (pH \times P))$ с прогнозирующим эффектом более 70 %. Так как в структуре почвенного покрова подтаежной зоны дерново-подзолистые и серые лесные почвы составляют сопутствующие комплексы, мы сделали расчеты, в которые вошли оба типа. Оказалось, что при объединенной оценке уровня плодородия серых лесных и дерново-подзолистых почв наиболее эффективны моде-

ли вида: $Y = \Gamma \times (M \times (pH \times FG))$ и $Y = \Gamma \times (pH \times (M \times P))$ (Γ – содержание гумуса, M – мощность гумусового горизонта, P – содержание P_2O_5 , FG – содержание физической глины). По обеим выборкам у них наибольший прогнозирующий эффект – 77–78 %. Такая точность допустима для бонитировки почв, а также может применяться при составлении мероприятий по повышению их продуктивности.

Итак, во всех моделях с высокой долей распознаваемости первое место занимает гумус. Высокий ранг имеет мощность гумусового горизонта, но в отличие от содержания гумуса это нерегулируемый или ограниченно регулируемый фактор, так же, как и содержание физической глины. Присутствие в моделях рН и Р указывает на возможность повышения урожайности пшеницы на кислых почвах за счет регулирования кислотности и повышения содержания P_2O_5 в дерново-подзолистых и серых лесных почвах.

Моделирование урожайности сельскохозяйственных культур на черноземах имеет свои особенности, которые обусловлены значительной пестротой и комплексностью почвенного покрова. Площадь элементарных почвенных ареалов составляет от нескольких квадратных метров до десятков и реже сотен. В почвенном покрове широко распространены пятнистости черноземов, которые обуславливают значительное варьирование содержания гумуса, что убедительно доказал Н.Г. Рудой в исследованиях на выщелоченных черноземах Солянского стационара (Канская лесостепь). В партии из ста отобранных индивидуальных образцов экстремумы представлены значениями 4,9 и 9,4 %, охватывая почвенные группы градации – очень низкого и высокого содержания [9].

Информация, полученная в исследованиях на черноземах Красноярской лесостепи, позволила построить модели урожайности зерновых культур в зависимости от содержания в почве органических веществ. В объединенную выборку вошли опыты с пшеницей, ячменем и овсом, где продуктивность была сопоставимой. Среднее содержание углерода гумуса в выборке составляло 2,01 % или 3,46 % гумуса. Содержание подвижных гумусовых веществ колебалось от 90 до 393 мг С/100 г почвы. Средняя урожайность зерна составляла 2,43 т/га.

При построении модели урожайности зерновых культур на черноземе обыкновенном использовали методы линейного и нелинейного регрессионного анализа (табл. 3).

**Модели урожайности зерновых культур
в зависимости от содержания в почве органических веществ**

Тип связи	n	F _{факт.}	r	Модель урожайности	Sr
Линейная	60	8,3	0,36	$y_1 = 0,465 \cdot x_1 + 1,496$	21,9
Криволинейная	60	12,3	0,42	$\ln(y_1) = 0,44 \cdot \ln(x_1) + 0,56$	21,7
Линейная	60	6,6	0,32	$y_2 = 0,002 \cdot x_2 + 1,931$	21,8
Криволинейная	60	13,1	0,44	$\ln(y_2) = 0,266 \cdot \ln(x_2) - 0,55$	21,6

Примечание: n – число наблюдений; F_{факт.} – критерий Фишера; r – коэффициент корреляции; y₁, y₂ – урожайность зерна, т/га; x₁ – содержание в почве углерода гумуса (C_{гумуса}, %); x₂ – содержание в почве подвижных гумусовых веществ (C_{0,1н.НаОН}, мг/100 г); Sr – ошибка математической модели, %.

Оказалось, что на почвах Красноярской лесостепи модели урожайности зерновых культур статистически доказываются по критерию Фишера. Полученные модели урожайности позволили рассчитать минимальные, средние и максимальные значения углерода гумуса, подвижных гумусовых веществ и соответствующие им уровни урожайности зерновых культур. Выяснилось, что минимальное содержание гумуса соответствует 2,10–3,03 %, среднее – 3,02–4,02, высокое – 4,02–5,10 %. Полученная информация позволила заключить, что нижнее значение оптимального содержания общего углерода можно принять как 2,33 % или 4,00 % гумуса. Это значение в предложенной градации соответствует верхнему значению среднего содержания и нижнему значению высокого содержания гумуса. На базе этих значений разработана градация содержания гумуса применительно к зерновым культурам: менее 2,0 – очень низкое; 2,0–3,0 – низкое; 3,0–4,0 – среднее; 4,0–5,0 – высокое; более 5,0 – очень высокое. По содержанию подвижных гумусовых веществ (мг С/100 г почвы): менее 100 – очень низкое; 100–200 – низкое; 200–300 – среднее; 300–400 – высокое; более 400 – очень высокое [10].

Выводы. Для оценки уровня плодородия серых лесных почв наиболее приемлема модель $Y = G \times (M \times (pH \times P))$ с прогнозируемым эффектом 72 %. Для объединенной оценки уровня плодородия серых лесных и дерново-подзолистых почв наиболее эффективны модели вида: $Y = G \times (M \times (pH \times ФГ))$ и $Y = G \times (pH \times (M \times P))$. По обеим выборкам у них наибольший прогнозирующий эффект – 77–78 %. Такая точность приемлема для бонитировки почв, а также может применяться при составлении мероприятий по повышению их продуктивности.

Математические модели урожайности позволили рассчитать минимальные, средние и максимальные значения углерода гумуса, подвижных гумусовых веществ и соответствующие им уровни урожайности зерновых культур на черноземах Красноярской лесостепи. Минимальное содержание гумуса соответствует 2,10–3,03 %, среднее – 3,02–4,02, высокое – 4,02–5,10 %. Нижнее значение оптимального содержания общего углерода можно принять как 2,33 % или 4,00 % гумуса.

Список источников

1. Кураченко Н.Л., Колесник А.А. Структура и запасы гумусовых веществ агрочернозема в условиях основной обработки // Вестник КрасГАУ. 2017. № 9. С. 149–157.
2. Власенко О.А. Динамика углерода подвижного гумуса в агрочерноземе при возделывании яровой пшеницы с помощью ресурсосберегающих технологий // Вестник КрасГАУ. 2015. № 9. С. 60–67.
3. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
4. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере. Новосибирск, 2004. 162 с.
5. Липкина Г.С. Изучение параметров почв в полевых и приближенных к полевым условиям // Теоретические основы и методы определения оптимальных параметров свойств почв / Почв. ин-т им. Докучаева. М., 1980. С. 29–42.
6. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 1985. 376 с.
7. Пузаченко Ю.Г., Мошкин А.В. Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях // Итоги науки. Сер. Мед.-геогр. 1969. Вып. 3. С. 23–31.

8. *Бурлакова Л.М.* Применение информационно-логического анализа в бонитировке почв // Тез. докл. V Делегатского съезда Всесоюз. об-ва почвоведов. Минск, 1977. Вып. 5. С. 235–237.
9. *Рудой Н.Г., Трубников Ю.Н.* Продуктивность зернопаропропашного севооборота на черноземах в Приенисейской Сибири // Вестник КрасГАУ. 2016. № 2. С. 134–138.
10. *Шпедт А.А.* Оценка и оптимизация органического вещества почв сельскохозяйственных угодий Красноярского края / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2013. 230 с.
4. *Sorokin O.D.* Prikladnaya statistika na komp'yutere. Novosibirsk, 2004. 162 s.
5. *Lipkina G.S.* Izuchenie parametrov pochv v polevyh i priblizhennyh k polevym usloviyam // Teoreticheskie osnovy i metody opredeleniya optimal'nyh parametrov svojstv pochv / Pochv. in-t im. Dokuchaeva. M., 1980. S. 29–42.
6. *Orlov D.S.* Himiya pochv. M.: Izd-vo MGU, 1985. 376 s.
7. *Puzachenko Yu.G., Moshkin A.V.* Informacionno-logicheskij analiz v mediko-geograficheskikh issledovaniyah // Itogi nauki. Ser. Med.-geogr. 1969. Vyp. 3. S. 23–31.
8. *Burlakova L.M.* Primenenie informacionno-logicheskogo analiza v bonitirovke pochv // Tez. dokl. V Delegatskogo s'ezda Vsesoyuz. ob-va pochvedov. Minsk, 1977. Vyp. 5. S. 235–237.
9. *Rudoj N.G., Trubnikov Yu.N.* Produktivnost' zernoparopashnogo sevooborota na chernozemah v Prienisejskoj Sibiri // Vestnik KrasGAU. 2016. № 2. S. 134–138.
10. *Shpedt A.A.* Ocenka i optimizaciya organicheskogo veschestva pochv sel'skohozyajstvennyh ugodij Krasnoyarskogo kraya / Krasnoyar. gos. agrar. un-t. Krasnoyarsk, 2013. 230 s.

References

1. *Kurachenko N.L., Kolesnik A.A.* Struktura i zapasy gumusovyh veschestv agrochernozema v usloviyah osnovnoj obrabotki // Vestnik KrasGAU. 2017. № 9. S. 149–157.
2. *Vlasenko O.A.* Dinamika ugleroda podvizhnogo gumusa v agrochernozeme pri vozdeystvovanii yarovoj pshenicy s pomoshch'yu resurso-sberegayuschih tehnologij // Vestnik KrasGAU. 2015. № 9. S. 60–67.
3. *Agrohimicheskie metody issledovaniya pochv.* M.: Nauka, 1975. 656 s.

