

Чему нас учат длительные полевые опыты?

Р. Нортон, Р. Перрис и Р. Армстронг

Длительный полевой опыт, заложенный в 1916 г. в п. Лонгеренонг (Австралия) – это источник данных для оценки многолетних тенденций урожайности при разных системах земледелия, а также здоровья почвы за длительный период наблюдений. Опыт в Лонгеренонге дает нам в сущности такую же информацию, как и другие длительные агрономические опыты. Основным выводом заключается в том, что высокая и устойчивая продуктивность сельскохозяйственных культур достигается в таком севообороте, где оптимизируется борьба с сорняками и болезнями растений, улучшается структура почвы и возмещается вынос элементов питания с урожаем.

В длительных агрономических опытах отрабатываются новые разработки и технологии земледелия. Самые продолжительные из действующих многолетних опытов были заложены в 1843 г. Ротамстедским исследовательским центром в Великобритании, где до настоящего времени проводится 7 таких опытов (Rasmussen et al., 1998). В мире сохранилось только 10 классических длительных опытов (с продолжительностью более 50-ти лет), включая полевой опыт в Австралии, который называется «Севообороты в Лонгеренонге №1».

Опыт в Лонгеренонге – это старейший из действующих полевых опытов в Австралии. Он был заложен в 1916 г. в юго-восточной части страны вблизи г. Хоршам. Почва – вертисоль (Grey Vertosol) со щелочной реакцией среды, имеющая самомульчирующий верхний горизонт. Среднегодовое количество осадков составляет около 420 мм. Опыт в Лонгеренонге закладывался для того, чтобы с учетом урожайности сельскохозяйственных культур установить наиболее оптимальный севооборот. Со временем в рамках данного полевого опыта стали проводиться новые исследования, например, по применению суперфосфата. В опыте в 1-кратной повторности (ежегодно выращиваются все культуры севооборота) изучается 7 севооборотов: бесменная пшеница, пар – пшеница, пар – пшеница – овес (стравливаемый скоту), пшеница – ячмень – горох, пшеница – овес – горох, пар – пшеница – овес и пар – пшеница – овес – овес (стравливаемый скоту). Азотные удобрения не применяются, фосфорные удобрения вносятся в дозе 10 кг P¹/га под зерновые культуры и 5 кг P/га – под остальные культуры. Посев, борьба с сорняками и защита растений осуществляются в соответствии с зональными рекомендациями.

В почве азот и фосфор находятся в разных формах, различающихся по доступности растениям. Большая часть азота в почве сосредоточена в составе органического вещества, которое подвергается минерализации, и, в конечном итоге, азот становится доступным для поглощения растениями в нитратной форме. Внесенный с удобрениями фосфор переходит в почве в формы, различающиеся по скорости десорбции, растворения и минера-



Обучение ученых и фермеров на полевом опыте в Лонгеренонге имеет длительную историю. Эта фотография была сделана в 1930 г. на ежегодном «Дне поля».

лизации² фосфатов, а, следовательно, и по доступности растениям. При анализе почвы определяется содержание наиболее доступных растениям форм фосфора [извлекаемых, например, ионообменными смолами, растворами NaHCO₃ и NaOH] (Hedley et al., 1982). При разработке систем применения фосфорных удобрений на перспективу очень важно понимать, в какие формы в почве переходит внесенный с удобрениями фосфор.

Исследования, проведенные в течение более 90 лет, «дали» нам ряд уроков по урожайности зерновых культур, выносу элементов питания из почвы растениями, а также по устойчивости земледелия в целом.

Урок 1: Устойчивые урожаи можно получить в течение долгого времени

На рис. 1 показана средняя урожайность пшеницы за многолетний период наблюдений. На графике выделяются определенные этапы, например, повышение урожайности, начавшееся в 1975 г., связано с началом применения гербицидов в опыте (Hannah and O'Leary, 1995). В течение последних 10-ти лет много проблем доставляет корневая нематода рода *Pratylenchus*, а также засорение посевов кострецом, но тенденция снижения урожайности, наблюдаемая примерно с 2000 г., объясняется недостаточным выпадением осадков в данный период. Только при

1 - В пересчете на элемент – P (здесь и далее – прим. переводчика)

2 - Минерализация органических фосфатов

Таблица 1. Хозяйственный баланс азота и фосфора для 7-ми севооборотов длительного полевого опыта в Лонгеренонге (1986-2008 гг.).

Севооборот, 1986-2006 гг.	Средняя урожайность пшеницы ³ , т/га	Баланс фосфора, Δ кг P/га/год	Баланс азота, Δ кг N/га/год
Бесменная пшеница	0.64±0.52	7.3	-7.3
Пар – пшеница	1.50±0.76	0.9	-11.8
Пар – пшеница – овес (сравливаемый скоту)	2.05±0.97	-0.3	-10.6
Пшеница – ячмень – горох	1.46±1.31	3.2	2.9
Пшеница – овес – горох	1.39±1.24	1.2	1.8
Пар – пшеница – овес	1.86±0.95	3.0	-13.9
Пар – пшеница – овес – овес (сравливаемый скоту)	2.11±0.96	-0.1	-12.1

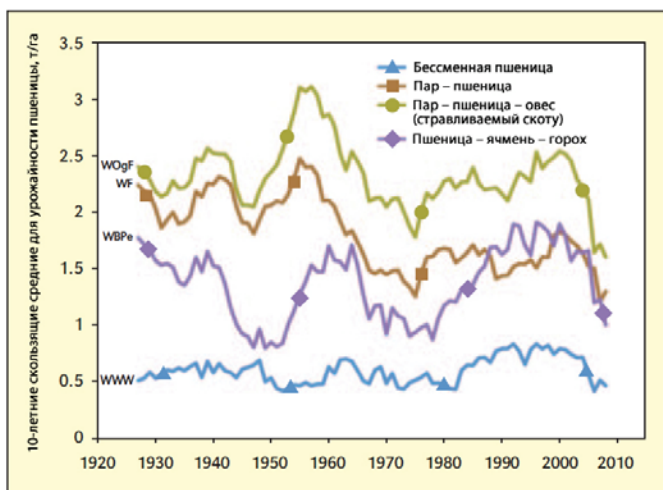


Рис. 1. Урожайность зерна пшеницы в 4-х из 7-ми севооборотов длительного полевого опыта в Лонгеренонге. Представлены 10-летние скользящие средние за период 1916-2008 гг.

монокультуре пшеницы не отмечается тенденции снижения урожайности, поскольку она с самого начала была низкой.

В опыте в Лонгеренонге самая высокая продуктивность культур достигнута в севообороте пшеница – ячмень – горох. Продуктивность культур в данном севообороте, выраженная в биоэнергетических эквивалентах, в 2.5 раза превысила продуктивность бесменной пшеницы (2.22 и 0.87 т/га/год в пересчете на глюкозу соответственно). Использование биоэнергетических эквивалентов позволяет оценить накопление энергии зерном и, кроме того, сравнить продуктивность сельскохозяйственных культур с разным накоплением энергии. В севообороте пшеница – ячмень – горох средняя урожайность пшеницы в течение последних 90 лет составила 1.52 т/га, гороха – 1.53 т/га, а ячменя – 1.57 т/га. Это наиболее рентабельный севооборот с учетом текущих цен на зерно. Включение в севообороты парового поля привело к ухудшению структуры почвы, но способствовало меньшему варьированию урожайности, особенно в годы с низким количеством осадков, которые наблюдались в течение последнего десятилетия (табл. 1).

Для успешной борьбы с сорняками и эффективной защиты растений от болезней необходимо

3 - И ошибка среднего

биологическое разнообразие культур в севообороте. Севооборот – это фундаментальный фактор, обеспечивающий устойчивое функционирование систем земледелия. Он способствует созданию оптимальных условий выращивания растений, поскольку обеспечивает необходимый перерыв в возделывании одной и той же культуры, что сдерживает распространение болезней. Кроме того, чередование культур в севообороте позволяет разработать альтернативные способы борьбы с сорняками и способствует улучшению физико-химических свойств почвы.

Урок 2: Необходимо учитывать баланс элементов питания

Стабильное получение продукции растениеводства в течение длительного периода времени все же требует определенных затрат. В табл. 1 приведен баланс азота и фосфора за последние 25 лет опыта в Лонгеренонге. Мы выбрали именно этот отрезок времени, поскольку в 1984 г. в опыте произошли небольшие изменения. Кроме того, в юго-восточной части Австралии затем наступил длительный за-



День открытых дверей в Лонгеренонгском Колледже в 1930 г.: ознакомление фермеров с новыми сортами.

сушливый период, когда количество выпадающих осадков было ниже среднемноголетних значений.

Данные по урожайности зерна имеются за все годы исследований, а содержание белка (и азота) в зерне стало определяться не так давно. Поступление фосфора с семенами не анализируется – используются результаты, полученные в других опытах. Хозяйственный баланс азота и фосфора рассчитывался следующим образом:

Таблица 2. Соотношение C:N, содержание общего азота, валового и подвижного фосфора (метод Олсена: 0.5 М NaHCO₃), а также частичные результаты определения группового состава фосфатов в почве: многолетний опыт в Лонгеренонге и залежь (образцы почвы отбирались в 2005 г.)

	Бессменная пшеница	Пар – пшеница	Пар – пшеница – овес (стравливаемый скоту)	Пшеница – ячмень – горох	Пшеница – овес – горох	Пар – пшеница – овес	Пар – пшеница – овес (стравливаемый скоту)	Залежь
Общий азот, %	0.070	0.056	0.063	0.085	0.087	0.061	0.066	0.162
C:N	13.3	16.2	14.9	13.0	12.9	13.9	13.8	13.1
Валовой фосфор, мг P/кг почвы	486	367	307	341	329	330	322	295
Подвижный фосфор, мг P/кг почвы	69	52	40	40	47	66	50	18
Фосфор, извлекаемый 1 М HCl, % от валового фосфора	39	25	18	25	22	23	19	7
Фосфор, не растворившийся в 4-х растворителях ⁴ , % от валового фосфора	35	43	47	49	52	50	61	75

N: Поступление с удобрениями + Фиксация бобовыми культурами - Вынос с зерном

P: Поступление с удобрениями - Вынос с зерном

Мы не учитывали поступление азота за счет азотфиксации свободноживущими микроорганизмами и абиотической фиксации азота, а также газообразные потери азота из почвы и потери азота в результате вымывания и эрозии почвы. Фиксация N₂ из атмосферы горохом определялась исходя из урожайности зерна и максимального накопления биомассы растений при индексе урожайности⁵, равном 0.3. Биомасса растений пересчитывалась на фиксированный азот с учетом фиксации 25 кг N/т биомассы (Peoples et al. 2001). Вынос азота с зерном был рассчитан исходя из содержания азота в зерне пшеницы, ячменя, овса и гороха и урожайности зерна данных культур. Пожнивные растительные остатки и растения овса после стравливания оставались на опытных делянках. Содержание фосфора в зерне было проанализировано в 2005 г., и вынос фосфора с зерном рассчитывался на основе этих данных. Безусловно, содержание фосфора в зерне зависит от конкретных условий обеспеченности почвы подвижными формами фосфора.

Как следует из **табл. 1**, с 1984 г. баланс азота в севооборотах без бобовой культуры был отрицательным и составил в среднем -12 кг N/га/год, но при включении гороха в севообороты баланс азота был положительным.

Исходные почвенные образцы, отобранные перед закладкой опыта более 90 лет назад, не были сохранены, поэтому был отобран образец почвы с залежного участка поблизости от опыта. Содержание общего азота и углерода в залежи (слой 0-10 см) в целом согласуется с отрицательным балансом

4 - Отношение массы зерна к надземной биомассе растений [абсолютно сухое вещество]

5 - Ионообменная смола, растворы NaHCO₃, NaOH и HCl

азота. С учетом схемы опыта более глубокий анализ данных не представляется возможным, однако результаты указывают на более высокое соотношение C:N в почве для севооборотов с паровым полем, отражая тем самым постепенное снижение содержания органического вещества в почве и изменение его состава в данных системах земледелия.

В **табл. 1** приводится также баланс фосфора для севооборотов, изучаемых в Лонгеренонге. Тэнг с соавт. (Tang et al., 2006) определяли групповой состав фосфатов в почве в данном опыте. Результаты исследований частично представлены в **табл. 2**. Положительный баланс фосфора отмечается для всех севооборотов, за исключением двух, где есть поля стравливаемого скоту овса. Содержание в почве валового фосфора и труднодоступных фосфатов, извлекаемых раствором соляной кислоты, повыси-



Лонгеренонгский Колледж одним из первых в Юго-Восточной Австралии стал проводить опыты по внесению суперфосфата под зерновые культуры.

лось во всех севооборотах, но сильнее всего – под бессменной пшеницей. Положительный баланс фосфора был выше всего именно при монокультуре пшеницы. Систематическое применение фосфорных удобрений в полевом опыте в Лонгеренонге повышало валовое содержание фосфора в почве, но снижало относительное содержание доступных растениям форм фосфора.



Роджер Перрис (слева) со студентами 2-го курса, обучающимися агрономии в Мельбурнском университете, на опытной делянке в Лонгеренонге.

Что служит источником азота в почве для растений? К сожалению, в опыте в Лонгеренонге, как уже отмечалось, не были сохранены исходные почвенные образцы, но для сравнения можно использовать результаты почвенных анализов для залежного участка. В табл. 2 дается содержание общего азота и соотношение C:N в почве. Если принять содержание общего азота в залежи за исходную точку, то можно оценить величину ежегодного снижения данного показателя. Полученные значения по большей части согласуются с расчетами баланса азота и указывают на то, что снижение содержания общего азота в почве происходит в основном в результате минерализации органического вещества. Поэтому вывод один – азот для питания растений поступает за счет реакций окисления органического вещества почвы, то есть при этом происходит снижение запасов органического углерода в почве. Таким образом, следует понимать, что для сохранения запасов органического углерода необходимо вносить в почву азот (и фосфор).

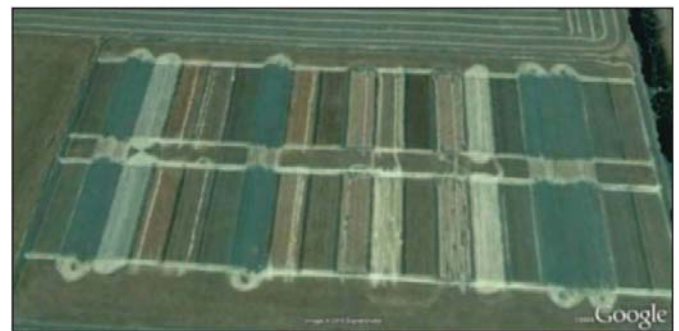
Какова судьба фосфора, внесенного в почву с удобрениями? Как показали исследования, длительное применение фосфорных удобрений повышает валовое содержание фосфора в почве, что в целом согласуется с приходными и расходными статьями баланса фосфора, приведенного в табл. 1. Группы почвенных фосфатов различаются по доступности растениям. Согласно полученным результатам, почти весь внесенный с удобрениями фосфор перешел в труднодоступные для растений формы (группа кислоторастворимых фосфатов и фосфатов, не растворяющихся в использованных вытяжках). Тэнг с соавт. (Tang et al., 2006) отобрали почву со всех полей опыта и изучили отзывчивость разных сельскохозяйственных культур на применение фосфорных удобрений в условиях вегетационного павильона. Несмотря на достаточную обеспеченность почвы подвижным фосфором (метод Олсена), была выявлена отзывчивость растений на внесение фосфорных удобрений. Поэтому вывод один – в изученных щелочных почвах процессы фикса-

ции фосфатов протекают быстро, и общепринятые методы анализа содержания подвижного фосфора в почве не очень надежны для прогнозирования отзывчивости растений на применение фосфорных удобрений. Кроме того, протестированные в вышеуказанном исследовании культуры по-разному отзывались на внесение фосфора. Авторы пришли к выводу, что на изученных почвах эффективность использования фосфора из удобрений можно повысить, если применять фосфорные удобрения исходя из выноса фосфора урожаем.

Содержание углерода в почве. При минерализации органического вещества содержание органического углерода в почве снижается. Учитывая всеобщую заинтересованность в сохранении запасов органического углерода в почвах, в таких длительных агрономических опытах, как опыт в Лонгеренонге, в реальных условиях – при разных системах земледелия можно получать уникальные данные по запасам углерода в почве. Об этом не задумывались в 1916 г., когда закладывался опыт, но теперь в рамках нового научно-исследовательского проекта в опыте будут определяться запасы углерода по профилю почвы, а также плотность почвы.

Выводы

Результаты длительных агрономических опытов имеют фундаментальное значение, поскольку свидетельствуют о том, что функционирование систем земледелия, включая пастбищные системы, может осуществляться в течение многих десятилетий. В зависимости от используемых стратегий данные системы земледелия будут и дальше продолжать обеспечивать нас пищей и растительными волокнами без причинения ущерба природным ресурсам. Имитационные компьютерные модели, разработанные для разных систем земледелия, в том числе и для пастбищных систем, помогают нам анализировать информацию, но для калибровки подобных моделей необходимы реальные экспериментальные данные. Выводы, сделанные на основе 10-20-летних и 50-летних полевых опытов, могут быть принципиально разными. Длительные агрономические



Спутниковый снимок полевого опыта в Лонгеренонге от картографического сервиса Google Earth и компании «ДиджиталГлоуб» (DigitalGlobe), показывающий расположение делянок. Площадь опытной делянки изначально составляла 0,4 га. В 1986 г. было проведено расщепление делянок: на их южной половине стали выращиваться современные сорта пшеницы, а на северной – остался старый сорт Гурха (Ghurkha).

опыты позволяют нам проанализировать тенденции изменения продуктивности сельскохозяйственных культур в зависимости от их чередования в севообороте и систем обработки почвы. С самого начала функционирования длительных агрономических опытов мы используем их результаты для установления факторов, от которых зависят устойчивость земледелия и качество окружающей среды, а также адаптация сельскохозяйственных культур к изменяющимся условиям выращивания.

Несмотря на то, что мы уже много знаем о влиянии систем земледелия на здоровье почвы ("известные" параметры), есть и показатели, которые пока ещё не были подвергнуты параметризации ("известные неизвестные", например, содержание углерода в почве). Существуют, безусловно, и другие показатели, которые мы еще даже и не принимаем во внимание. Спланировать изучение этих "неизвестных неизвестных" и оценить стоимость исследований достаточно трудно. Однако наличие хорошо спланированных и обеспеченных надлежащими ресурсами длительных полевых опытов может сыграть очень важную роль в подобных исследованиях. Как замечено Рассмуссеном с соавт. (Rasmussen et al., 1998), «чтобы лучше предсказать будущее, необходимо иметь целостное представление о прошлом».

Г-н Перрис – технический специалист Департамента базовых отраслей промышленности штата Виктория (г. Хоршам, Австралия) и руководитель длительного полевого опыта в Лонгеренонге.
Д-р Армстронг – Главный агроном Департамента

базовых отраслей промышленности штата Виктория, г. Хоршам. Д-р Нортон – Региональный директор Международного института питания растений по Австралии и Новой Зеландии, г. Хоршам; e-mail: rnorton@ipni.net.

Благодарности

Работа по определению баланса элементов питания была проведена при поддержке Корпорации по исследованиям и разработкам в области зерновых культур (Grains Research and Development Corporation), Проект UM00023. Авторы преклоняются перед дальновидностью специалистов, заложивших многолетние полевые опыты, и признательны поколениям сотрудников, участвовавшим в проведении опытов с момента закладки.

Литература

- Hannah, M. and G.J. O'Leary. 1995. *Aust. J. Exp. Agric.* 35, 951-60.
Hedley, M.J., J.W.B. Stewart, and B.S. Chauhan. 1982. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:970-976.
Peoples, M.B., A.M. Bowman, R.R. Gault, et al. 2001. *Plant and Soil* 228, 29-41.
Rasmussen, P.E., K.W.T. Goulding, et al. 1998. *Science* 282, 893-896.
Tang, C., L. Dart, C. Rogers, et al. 2006. *Phosphorus fractions in a Vertosol after 88-year crop rotations, The 3rd International Symposium on Phosphorus Dynamics in the Soil-Plant Continuum, May 14-19, 2006, Uberlandia, Brazil.*

Перевод с английского и адаптация: В.В. Носов.

Индустрия минеральных удобрений: соответствие концепции «4-х правил»

Т. Бруулсема

Концепция «4-х правил» применения удобрений принята подавляющей частью производителей минеральных удобрений, а также их партнерами в области сельского хозяйства, в правительственных кругах и экологическом движении. Данная концепция освещает основные аспекты ответственного управления питанием растений и предназначена для использования всеми заинтересованными сторонами, осуществляющими как производственную, так и непроизводственную деятельность. Концепция «4-х правил» учитывает условия каждого конкретного региона – система применения удобрений разрабатывается с учетом региональной специфики. Согласно основному положению концепции, для устойчивого ведения сельскохозяйственного производства необходима оптимизация форм, доз, сроков и способов внесения удобрений. Адаптивные подходы к разработке системы применения удобрений должны поддерживаться промышленностью минеральных удобрений на всех уровнях. Слаженная работа всех сегментов, включая производителей минеральных удобрений, оптовиков и ритейлеров, поставщиков услуг в сфере сельского хозяйства, а также инвесторов помогает сельхозпроизводителям принимать правильные решения и, следовательно, повышать эффективность используемых систем земледелия.

Примерно 25 лет назад Международная комиссия ООН по окружающей среде и развитию выпустила доклад «Наше общее будущее». В данном докладе были заложены основы концепции устойчивого развития, в том числе и

для сельского хозяйства. В течение последних нескольких лет тема устойчивости стала очень важной для крупных корпораций, включая компании сельскохозяйственного и продовольственного секторов экономики. Для повышения эффективности