

Элементы плодородия и урожайность озимой пшеницы в связи с удельным электрическим сопротивлением почвы

А.М. Изотов, д.с.-х.н., профессор, Б.А. Тарасенко, к.с.-х.н., Д.П. Дударев, к.с.-х.н., АБиП ФГАОУ ВО Крымский ФУ

Важным условием импортонезависимости и продовольственной безопасности страны является повышение эффективности отрасли растениеводства на основе максимизации использования посевами полевых культур зональных почвенно-климатических ресурсов. Развитие этого направления возможно на принципах концепций адаптивно-ландшафтного и точного земледелия. Для контурно-ландшафтной организации территорий, реализации точных технологий выращивания сельскохозяйственных культур, в том числе основного источника получения продовольственного зерна — озимой пшеницы, необходимо соответствующее информационное обеспечение [1]. Его существенной составляющей являются геокодированные данные особенностей рельефа местности,

пространственных распределений агрохимических и агрофизических показателей почвы, результатов дистанционного зондирования состояния посевов, автоматизированного учёта урожайности и др. Важная роль в получении такого рода данных отводится быстрым, экономным и эффективным измерениям характеристик почвы. Среди них наибольшее распространение получили методы измерения показателей электропроводности или электрического сопротивления заданных слоёв почвы [2, 3].

Как известно, результаты горизонтального электропрофилирования земельных площадей используют для пространственной локализации выраженных неоднородностей пористости, водоудерживающей (дренажной) способности почв, ёмкости катионного обмена, глубины залегания каменных пород, засоления почв и грунтовых вод, применяют для оптимизации как числа, так и мест расположения пунктов отбора проб при агрохими-

ческом обследовании полей [3, 4]. Применительно к условиям предгорной зоны Крыма представляется перспективным изучение возможности поиска методами электроразведки проблемных участков полей с повышенной дренированностью почвы, обусловленных приповерхностными выходами покровных галечниковых наносов аллювиально-пролювиального происхождения [5], а также использования её данных для оптимизации сетки агрохимического обследования.

Материалы и методы исследования. Исследования проводили в предгорной зоне Крыма на участке поля озимой пшеницы площадью 2,2 га. Почва — чернозём южный малогумусный мицеллярно-карбонатный на красно-бурых плейстоценовых глинах. Отбор почвенных проб для агрохимических анализов и позиционирование пикетов для электропрофилирования проводили по регулярной сетке, отвечающей 64 делянкам по 340 м² (11,3×30 м) для учёта урожайности зерна. Такое соотношение сторон не выходило за пределы ограничений на анизотропию сети съёмки пространственно рас-пределённых показателей [4, 6].

Почвенные пробы для диагностики доступных фосфатов отбирали до посева озимой пшеницы из слоя почвы 0–20 см. Для определения ранней весной запасов азота нитратов в почве отбор проб проводили послойно, через 20 см до глубины 80 см. Содержание подвижных фосфатов определяли по Мачигину, азота нитратов — в гомогенизированных свежих пробах по Грандваль — Ляжу с дисульфифеноловой кислотой. Урожай убирали поделочно прямым комбайнированием с приведением результатов к 100-процентной чистоте и стандартной влажности.

Весной, после возобновления вегетации озимых, когда почва опытного участка была в увлажнённом состоянии, провели электропрофилирование методом сопротивлений на постоянном токе. В качестве интегральной характеристики удельного сопротивления исследуемого слоя почвы использовали принятое в электроразведке понятие кажущегося сопротивления (КС), измеряемого в Ом · м [7]. Для электроразведки применяли симметричную четырёхэлектродную установку Веннера AMNB (рис. 1).

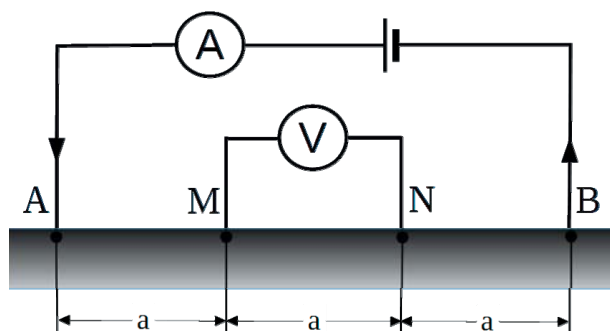


Рис. 1 – Четырёхэлектродная градиентная установка Веннера

Длина питающей линии АВ установки составила 2,7 м, что при отсутствии в диагностируемом слое высокоомных или проводящих экранов обеспечивало глубину установки в пределах 0,9–1,3 м [4].

Такие параметры установки оптимизированы под поиск неоднородностей в активном и прилегающих к нему слоях почвы и согласуются с техническими характеристиками серийных кондуктомеров для измерения удельной электропроводности почвы, используемых в точном земледелии [8].

Результаты исследования. В территориально ограниченных пределах опытного участка, сопоставимого с элементарными априори однородными площадками при агрохимическом исследовании в рамках концепции пространственного применения минеральных удобрений, выявлены тем не менее существенные внутренние неоднородности поставленных на изучение агрохимических показателей плодородия почвы, её электропроводности (сопротивления) и урожайности зерна озимой пшеницы (табл. 1).

При сравнительно небольшой пространственной вариации содержания азота нитратов в слое почвы 0–80 см его колебания по территории участка достигали почти двукратной величины, изменяясь от уровня выраженного дефицита до умеренной обеспеченности пшеницы азотным питанием. Вариация содержания подвижных фосфатов в пахотном слое почвы была сильнее. Практически трёхкратные колебания (2,8 раза) этого показателя определяли уровни обеспеченности посева фосфорным питанием в пределах

1. Сводка анализа сопряжённых вариационных рядов кажущегося сопротивления почвы (КС), содержания подвижных фосфатов (P₂O₅), нитратов почвы (N-NO₃) и урожайности зерна озимой пшеницы (Y)

Показатель	КС, Ом · м	P ₂ O ₅ , мг на 100 г почвы	N-NO ₃ , кг/га	Y, ц/га
	слой почвы			
	до 0,9–1,4 м	0–20 см	0–80 см	
Среднее	46	1,7	95	18,7
Минимум	1	0,8	66	10,1
Максимум	85	2,2	114	26,2
Стандартное отклонение	26,03	0,33	10,07	3,39
Коэффициент вариации	0,57	0,20	0,11	0,18
Коэффициент корреляции с КС	1,00	-0,13	0,18	-0,51

от острой нуждаемости до умеренного дефицита. Значения кажущегося электрического сопротивления метрового слоя почвы по территории участка колебались в разы сильнее — от минимальных значений, интерпретируемых как сопротивление слоя увлажнённых глин, до максимальных, предположительно рассматриваемых как интегральное сопротивление исследуемого глинистого слоя с глубоко внедрёнными в него дренированными каменистыми галечниковыми наносами. Пространственная вариабельность урожайности зерна озимой пшеницы была также значительной, с колебаниями в пределах 2,5-кратной разницы между её минимальными и максимальными значениями.

Следовательно, на типичных для предгорной зоны Крыма почвах могут встречаться мелко-контурные участки с выраженными контрастами содержания элементов минерального питания, электрофизических свойств и уровней урожайности озимой пшеницы. В контексте рассматриваемой задачи целесообразно оценить степень связи агрохимических показателей почвы и урожайности зерна с территориально сопряжёнными с ними данными горизонтального электропрофилирования. Результаты парных корреляционных анализов (табл. 1) свидетельствуют о наличии достоверной обратной связи средней интенсивности урожайности зерна с интегральной величиной удельного сопротивления метрового слоя почвы. Корреляции содержания подвижных фосфатов в пахотном слое и азота нитратов в слое 0–80 см с показателем КС были статистически не доказаны, так как абсолютные величины их коэффициентов не достигали 5-процентных критических значений, равных 0,246 для 64 пар наблюдений.

Данное обстоятельство свидетельствует о перспективности использования в предгорном Крыму электроразведки для поиска и локализации проблемных участков поля в отношении урожайности озимой пшеницы. С точки зрения оптимизации сетки отбора проб для агрохимических анализов при отсутствии в наших исследованиях значимых корреляций КС с содержанием фосфатов и нитратов почвы необходимо сделать некоторое уточнение. В отличие от описанных случаев, подтверждающих информативность удельного электрического сопротивления почвы слоя 0–30 см в отношении агрохимических показателей [7], в нашем случае глубинность электропрофилирования была втрое

выше, что с большой долей вероятности могло «смазать» аномалии этого верхнего слоя.

Определённый интерес представляет не только выявление связи урожайности озимой пшеницы с удельной электропроводностью почвы, но и установление её характера на количественном уровне. С этой целью был проведён регрессионный анализ зависимости урожайности от показателя КС. В процессе расчётов оказалось целесообразным ввести в регрессию показатель обеспеченности почвы фосфором. В качестве исходной модели регрессии был принят неполный квадратичный полином. После коррекции степеней и последовательного исключения незначимых параметров получена сводка анализа (табл. 2).

Из неё следует, что в итоговом уравнении сохранился параметр нелинейного действия удельного сопротивления почвы на урожайность с отрицательным коэффициентом. Повышение удельного электросопротивления в опыте сопровождалось закономерным снижением урожайности в количестве, пропорциональном корню 2,5-й степени из показателя КС. С другой стороны, в него также вошло взаимодействие удельного сопротивления с обеспеченностью почвы подвижными фосфатами при положительном коэффициенте регрессии.

Его эффект состоит в некотором смягчении отрицательного действия на урожайность высокоомных участков почвы на фоне лучшей обеспеченности фосфором.

Регрессия в целом (1) контролирует треть всех колебаний урожайности по учётным площадкам при высокой степени значимости ($F = 15,424$) при 61 степени свободы, что соответствует ($\alpha < 0,00001$):

$$Y = 24,09 - 1,519KS^{0,4} + 0,0318(KS^{0,4} \cdot P_2O_5), \quad (1)$$

где КС — кажущееся удельное электрическое сопротивление слоя почвы до 0,9–1,4 м, Ом·м; P_2O_5 — содержание подвижных фосфатов по Мачигину в слое 20 см, мг на 100 г почвы; Y — урожайность озимой пшеницы, ц/га.

Наблюдаемые в опыте и предсказанные по уравнению регрессии значения урожайности в целом согласуются, а в их отклонениях не наблюдаются выраженные нарушения случайного процесса, что подтверждает адекватность модели (рис. 2).

Увеличение удельного электрического сопротивления почвы сопровождается замедленным снижением урожайности озимой пшеницы (рис. 3).

2. Анализ уравнения регрессии урожайности озимой пшеницы на кажущееся электрическое сопротивление почвы (КС) и содержание подвижных фосфатов в пахотном слое (P_2O_5)

Параметр регрессии	Коэффициент регрессии	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение
Свободный член	24,0879	1,2336	19,526	<0,00001
$KS^{0,4}$	-1,5189	0,2777	-5,469	<0,00001
$(KS^{0,4} \times P_2O_5)$	0,0318	0,0134	2,364	0,02128

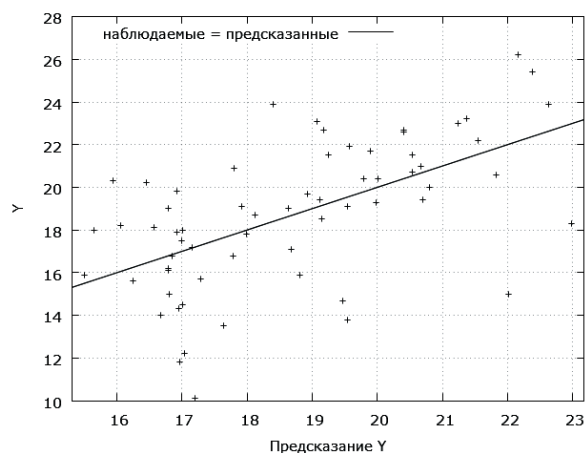


Рис. 2 – Соответствие наблюдаемых значений урожайности Y :
(+), предсказанным по регрессии (1): прямая линия

С учётом разрешающей способности модели наиболее высокая урожайность сформировалась на площадках с удельным электрическим сопротивлением до 20 Ом·м. Этим наиболее плодородным участкам соответствует ориентировочно, как минимум, метровый слой глин, обладающих высокой водоудерживающей способностью и создающих наиболее благоприятные условия обеспеченности растений влагой. Самая низкая урожайность (75% от максимальной) была получена на относительно высокоомных участках поля с удельным сопротивлением от 65 Ом·м. В рамках рабочей гипотезы они рассматриваются как участки, дренированные выходами в приповерхностные слои почвы галечниковых наносов материнской породы. Рекогносцировочное бурение в полной мере согласуется с этим предположением, отмечая в этих местах наличие гальки уже с глубин 30–40 см.

Выводы. Горизонтальное электропрофилирование с глубиной 0,9–1,4 м участка 2,2 га в предгорной зоне Крыма выявило значительную пространственную неоднородность удельного сопротивления почвы. Локализованные высокоомные аномалии интерпретируются как участки с повышенной дренированностью вследствие приповерхностных выходов галечниковых на-

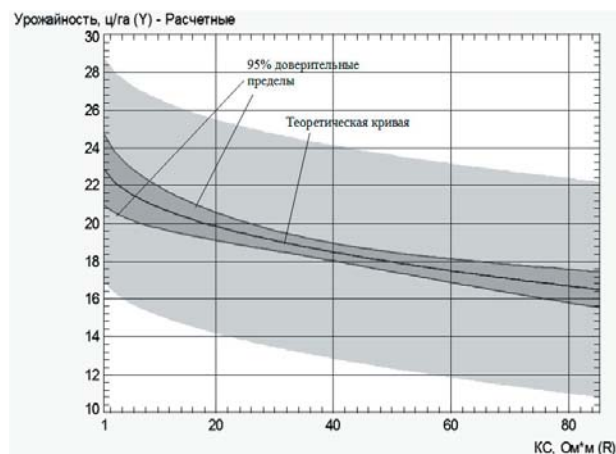


Рис. 3 – Урожайность зерна озимой пшеницы (Y) в зависимости от удельного электрического сопротивления почвы ($КС$) по регрессионной модели (1)

носов материнской породы. На таких площадках урожайность озимой пшеницы была доказуемо ниже и в среднем составляла 75% от её величины на участках со сравнительно высокой удельной электропроводностью почвы. Высокопроизводительный метод малоглубинной электроразведки перспективен в предгорном Крыму для локализации проблемных участков полей в рамках концепции точного земледелия.

Литература

1. Кирюшин В.И. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. 794 с.
2. Медведев В.В. Неоднородность почв и точное земледелие. Часть 1. Введение в проблему. Харьков: «Изд. 13 типография», 2007. 296 с.
3. Портал Агрофизического института Россельхозакадемии. [Электронный ресурс]. URL: www.agrophys.ru.
4. Хмелевской В.К. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для геофизических специальностей. М., 2005. 311 с.
5. Половицкий И.Я., Гусев П.Г. Почвы Крыма и повышение их плодородия: справ. изд. Симферополь: Таврия, 1987. 152 с.
6. Сычев В.Г. Афанасьев Р.А., Личман Г.И. и др. Методика отбора почвенных проб по элементарным участкам поля в целях дифференцированного применения удобрений. М.: ВНИИА, 2007. 36 с.
7. Манштейн А.К. Малоглубинная геофизика. Новосибирск, 2002. 135 с.
8. Веб-страница почвенных сенсоров Veris Technology. [Электронный ресурс]. URL: www.veristech.com/the-sensors.